

# TIIVISTYSTEKNIKKAA TIEN RAKENTAMISESSA



TIE- JA VESIRAKENNUSHALLITUS  
JÄRJESTELYTOIMISTO 1971

TVH 2.840 A4 650

17907

VII B

DE

TIE





TIIVISTYSTEKNIKKAA TIENRAKENTAMISESSA

Tie- ja vesirakennushallitus  
Järjestelytoimisto 1971



## S I S Ä L L Y S

Sivu

1.	TIIVISTÄMINEN	1
2.	TIIVISTÄMINEN TÄRYJJYRILLÄ	7
2.1	Y l e i s t ä	7
2.2	E r i k e r r o s t e n t i i v i s t ä - m i n e n	12
2.21	Eristyskerros	12
2.22	Jakavan ja eristyskerroksen saman aikainen tiivistäminen	14
2.23	Jakavan kerroksen tiivistäminen	19
2.24	Kantavan kerroksen tiivistäminen	19
3.	TIIVISTÄMINEN KUMIPYÖRÄJYRÄLLÄ	22
3.1	Y l e i s t ä	22
3.2	E r i k e r r o s t e n t i i v i s t ä - m i n e n	27
3.21	Eristyskerroksen tiivistäminen	27
3.22	Eristys- ja jakavan kerroksen saman aikainen tiivistäminen	28
3.23	Jakavan kerroksen tiivistäminen	31
3.24	Kantavan kerroksen tiivistäminen	32
4.	KANTAVUUS	34
5.	KASTELU	40

6.	TALVELLA TIIVISTÄMINEN	41
6.1	Yleistä	41
6.2	Lämpötilan ja kosteuden vaikutus kuivatilavuuspainoon	42
6.3	Tiivistyksen ajankohta	44
6.4	Milloin kannattaa tiivistää	46
6.5	Tiivistyskoneen käyttö levityskoneena	48
7.	TIIVISTYSKAPASITEETIT JA -KUSTANNUKSET	
7.1	Kapasiteettien laadintaperusteista	52
7.2	Tiivistyskustannukset	59
8.	KAPASITEETTI, JYRÄYSNOPEUS JA JYRÄYSKUSTANNUKSET	67
8.1	Keskiraskas täryjyvä	67
8.2	Raskas täryjyvä	70
8.3	Kumipyöräjäyvä	72
8.4	Yhteenveto	73

## 1. TIIIVISTÄMINEN

T i i v i s t ä m i s e l l ä tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä prosessia tien rakentamisessa, missä eri kerrosten materiaalin tilavuuspainoa yritetään kohottaa mekaanisin keinoin halutun suuruiseksi. Jotta materiaali tulisi alkutilaansa tiivimmäksi, edellyttää tämä rakeitten välisen tyhjätilan pienentämistä, mikä saadaan aikaan ilman ja veden poistamisella materiaalista. Kuivatilavuuspainon riippuvuutta näistä tekijöistä voidaan tarkastella kaavan 1 avulla

$$\gamma_k = \frac{(1 - V_i) \cdot \gamma_s}{1 + \frac{w}{100} \cdot \gamma_s} \quad (1)$$

missä  $\gamma_k$  = maa-aineksen kuivatilavuuspaino

$V_i$  = ilmatilavuus

$\gamma_s$  = maa-aineksen ominaispaino

$w$  = vesipitoisuus

Mekaanisesti tiivistyminen aikaan saadaan siten, että kumotaan partikkeleitten välisiä voimia ja saattamalla tällöin partikkelit lähemmäksi toisiaan. Partikkeleitten välisistä voimista mainittakoon sisäinen kitkavoima ja koheesiovoima, jotka muodostavat materiaalin leikkauslujuuden. Sisäinen kitka aiheutuu partikkeleitten hankauksesta toisiaan vastaan. Koheesio taas muodostuu partikkeleitten välisistä molekyylily- ym. kiinnevoimista. Nämä voimat riippuvat suuruudeltaan ja laadultaan maa-aineksen laadusta. Koheesio voimien vaikuttaa erityisesti molekyylisten pintavoimien aiheuttama kapillaari-ilmiö. Tämän ilmiön aikaan saama kapillaarinen voima riippuu sekä rakeitten halkaisijasta että niitä yhdistävän vesikalvon suuruudesta seuraavasti:

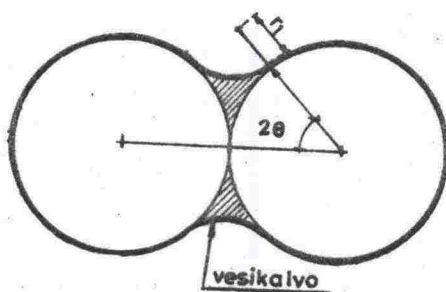
$$F_c = 2\pi RT \frac{1 - 2 \tan \theta}{1 + \tan \theta} \quad (2)$$

missä suureet R ja T ovat kuvan 1 mukaisesti

R = partikkelin säde

$\theta$  = kulma, joka on riippuvainen vesikalvon suuruudesta

T = veden ja ilman välinen pintajännityskerroin



Kuva 1. Kaksi partikkelia ja niitä yhdistävä vesikalvo

Laskemalla näiden voimien summa pintayksikköä kohti voidaan materiaalin pallomaisten partikkeleitten väliset kiinnevoimat määrittää. Voimien suuruus riippuu maa-aineksen tiivistilasta siten, että maksimitiiviydessä vetovoima pintayksikköä kohden on

$$q_{\max} = 7.25 \frac{T \cdot (1 - 2 \tan \theta)}{R \cdot (1 + \tan \theta)} \quad (3)$$

ja löyhimmässä tilassa

$$q_{\min} = \pi \cdot \frac{T \cdot (1 - 2 \tan \theta)}{R \cdot (1 + \tan \theta)} \quad (4)$$

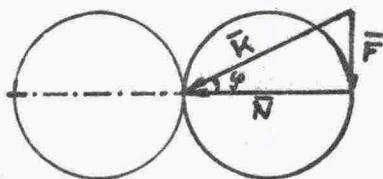
Kuivassa kitkamaassa, missä ei mitään huokosveden painetta esiinny, on kahden partikkelin välinen kiinnevoima riippuvainen ulkoisesta normaalivoimasta N ja kitkavoimasta F seuraavasti:



$$\bar{K} = \bar{N} + \bar{F}$$

(5)

$$K = N \tan \phi$$



Kuva 2. Kahden partikkelin välinen kiinnevoima.

Suure  $\phi$  on materiaalin todellinen kitkakulma. Kitka- ja koheesiomaalajien välimuodot, ns. välimuotolajit, noudattavat likipitään kitkamaan ominaisuuksia tässä suhteessa.

Kaavojen 2, 3 ja 4 kelpoisuuden ehtona on, ettei maa-aineksen vesipitoisuus nouse yli 1/4 osan huokostilavuudesta. Tämä johtuu siitä, että täysin kyllästetyssä materiaalissa kapillaariset voimat häviävät kokonaan ja täten myös niiden aiheuttamat näennäiset koheesiot häviävät. Kapillaarivoima ei aiheuta mitään huomattavaa leikkauslujuutta, mutta se lisää kuitenkin ns. negatiivisen huokospaineen muodossa tehokasta normaali-jännitystä, mikä tosin välillisesti lisää leikkauslujuutta. Kapillaarisen voiman aiheuttama kiinnevoima  $q$  kasvaa materiaalin tiiviysasteen kasvun sekä säteiden pienenemisen mukaan.

Rakeisuuden puolesta materiaalit voidaan jakaa lajittuneisiin, suhteellisen lajittuneisiin sekä lajittumattomiin. Lajittumattomat maa-ainekset tiivistyvät nopeasti erityisesti tärytyksen vaikutuksesta. Tämä johtunee siitä, että lajittumattomat ainekset sisältävät usean kokoisia rakeita, jolloin tärytys voi saada rakeet järjestäytymään niin, että pienet rakeet tunkeutuvat isompiensa väliin saaden siten aikaan tiiviin rakenteen (suuri tilavuuspaino). Lajittumatto-

missa materiaaleissa on tosin vaarana hyvälle tiivistyvyydelle liian suuri hienoaainespitoisuus (yläraja noin 10... 20 %  $\neq$  0.074 mm läpäisseestä seulasta), mikä hidastaa tiivistymistä. Tämä johtuu siitä, että veden läpäisevyys huononee, jolloin huokosveden poistuminen hidastuu.

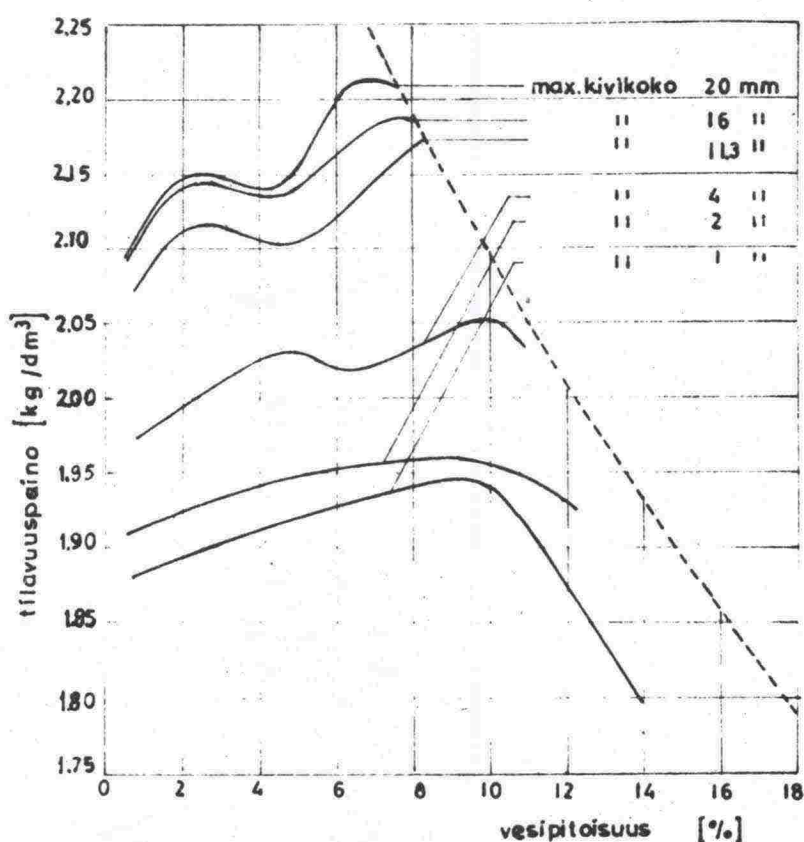
Se vesipitoisuus, jossa materiaali saadaan tehokkaimmin tiivistetyksi, on kääntäen verrannollinen materiaalin raekokoon. Tämä vesipitoisuus (=optimivesipitoisuus) on siis karkearakeisimmilla materiaaleilla pienempi kuin hienorakeisilla, mikä johtuu siitä, että hiukkaskoon pienetessä niiden kokonaispinta-ala kasvaa, jolloin myös veden tarve kasvaa maksimitiiviuden aikaan saamiseksi (kuva 3).

Erityisesti täryttäminen antaa materiaaleille kuivassa tai optimikosteassa tilassa huomattavasti parempia tiiviysarvoja kuin näiden välissä olevilla vesipitoisuuden arvoilla. Tämä ilmiö on havaittavissa kitkamaalajeissa (moreeni, hiesu, hietta, sora ja hiekka). Jos vesipitoisuus on yli optimimäärän, ei edullista lopputulosta voida saavuttaa. Tällöin ei edes tiivistystyömäärän lisääminen paranna tilannetta (kuva 4). Sen sijaan vesipitoisuuden ollessa optimissa tai hieman sen alapuolella saa tiivistystyömäärän lisääminen aikaan tuntuvaa kasvua kuivatilavuuspainoissa. Optimivesipitoisuudessa maa-aines yleensä saavuttaa maksimikuivatilavuuspainon tietyllä, vakiotiivistystyömäärällä, mutta jos tiivistystyömäärää lisätään päästään maksimiarvoon pienemmällä vesipitoisuudella.

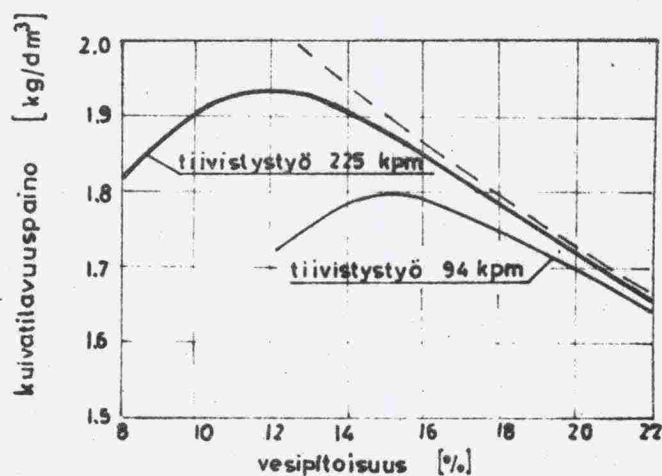
Luonnontilassa olevilla hienorakeisilla maa-aineksilla, kuten savella ja hiesulla, on taipumus sisältää vettä optimimäärää enemmän. Tällöin niiden plastiset ominaisuudet vaikeuttavat tiivistämistä. Veden keinotekoisella vähentämisellä saadaan näiden materiaalien leikkauslujuus kasvamaan, jolloin niiden kimmoiset ominaisuudet heikkenevät ja tiivistyminen jossain määrin helpottuu. Savelle on lisäksi ominaista, että sen sisäinen lujuus heikkenee tiivistystyön vai-



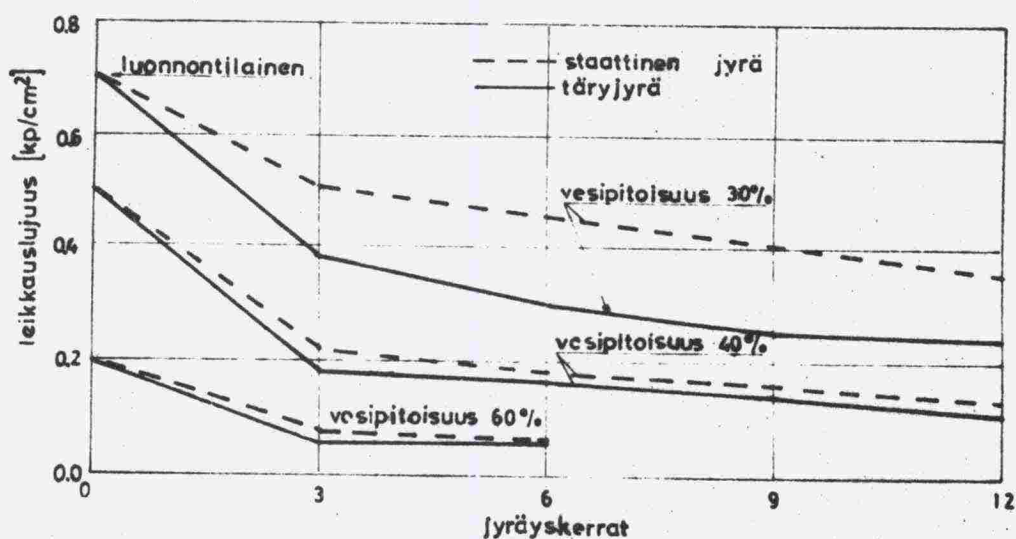
kutuksesta ja sen sensitiivisyys lisääntyy vesipitoisuuden noustessa. Suurilla vesipitoisuuksilla (40...60 %) ei tiivistystavalla ole juuri merkitystä saven leikkauslujuuteen, mutta vesipitoisuuden arvolla 30 % saa täryttiivistys aikaan huomattavasti alhaisempia leikkauslujuuksia kuin staattinen tiivistys. Leikkauslujuuden aleneminen saattaa olla hetkelistä, mutta savessa tapahtuu lisäksi pysyvää sisäisen lujuuden alenemista, jolloin materiaalin kantokyky heikkenee.



Kuva 3. Raekoon vaikutus optimivesipitoisuuteen



Kuva 4. Tiivistystyömäärän ja vesipitoisuuden vaikutus kuivatilavuuspainon suuruuteen.



Kuva 5. Ylituskertojen vaikutus saven leikkauslujuuteen 5...20 cm syvyydessä jyrättäessä tärä- ja staattisella jyrällä 50 cm paksua savikerrosta eri vesipitoisuuksia käyttämällä.

## 2. TIIVISTÄMINEN TÄRYJYRILLÄ

### 2.1 Yleistä

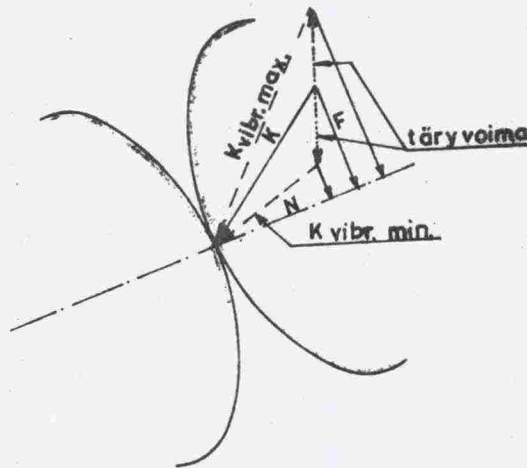
Dynaamisesta tiivistämistavasta voidaan erottaa kaksi osaa: materiaalin sisäisen kitkan vähentäminen ja dynaaminen voima. Sisäisen kitkan vähentäminen tulee kysymykseen silloin, kun tiivistettävä materiaali on irrallista, ts. silloin, kun se ei ole sidottu millään aineella. Näin on laita mm. tavallisella kitkamaalla. Sisäisen kitkan vähentäminen lienee tehokkainta silloin, kun täryliikkeen värähdystaajuus on vähintään tiivistettävän materiaalin ominaisfrekvenssin suuruinen.

materiaali	ominaisfrekvenssi r/min
Hk	1446
kHk	1602
hSr	1682
Sr	1700
(Sa)	(1650)

Taulukko 1. Eri materiaalien ominaisvärähtelylukuja.

Tärytyksen vaikutuksesta partikkelien välinen kiinnevoima  $K$  vaihtelee välillä  $K_{\text{vibr.max}}$  ja  $K_{\text{vibr.min}}$  (kuva 6). Kun voima  $K$  on minimissä, saa kuormittava voima rakeet siirtymään, koska myös kitkavoima  $F$  on tällöin minimissä.

Savea lukuunottamatta eliminoi dynaaminen täryvoima lähes kokonaan maa-aineksen sisäisen kiinteyden. Suurin vähennys levossa olevaan leikkausvoimaan saavutetaan sepelillä, soralla, hiekalla ja moreenilla kuivassa tai optimivesipitoisuudessa, jolloin tärytyksen aikaiset arvot ovat vain 1... 2 % lepotilan vastaavista arvoista, suuruudeltaan n. 0.01... 0.02 kp/cm<sup>2</sup>.



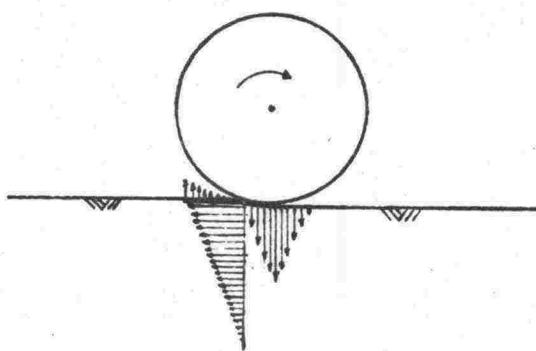
Kuva 6. Kiinnevoiman  $K$  vaihteleva tärätyksen vaikutuksesta.

Savessa tapahtuu osaksi hetkellistä leikkauslujuuden alenemista, osaksi myös pysyvää sisäisen lujuuden alenemista. Sisäinen lujuus on sekä kitka- että koheesioluonteista. Täräyttäminen alentaa saven kantokykyä. Saven plastisista ominaisuuksista johtuen myöskään ei riittävää paineen kehitystä tiivistymisen kannalta ilmeisesti ulkoisesti saada aikaan (täräytys lisää painetta savessa n. 50 %, kun taas esimerkiksi hiekalla paineen lisäys on n. 100 %).

Täräyenergiaan vaikuttaa myöskin täräyliikkeen amplitudi ja epäkeskomassa. Ohuissa (20...30 cm) hiekkakerroksissa suositellaan käytettäväksi n. 1.2 mm amplitudia. Hiekassa kerrospaksuuden kasvaessa iskun laajuus vaimenee kuitenkin melko nopeasti (mm. 100 cm syvyydessä amplitudi enää n. 3 % alkuarvosta). Sorassa voidaan käyttää erisuuruisia amplitudeja kerrospaksuudesta riippuen: pintaosassa n. 1.2 mm, n. 30...40 cm syvyydessä n. 3.5...4.1 mm, n. 80...100 cm syvyydessä n. 4...6 mm. Amplitudin muuntamisella suuremmasta pienempään voidaan saada kerros kauttaaltaan tiivistetyksi. Suuren amplitudin jatkuva käyttö saa pintakerroksen löyhtymään sekä aiheuttaa materiaalin murskaantumista.

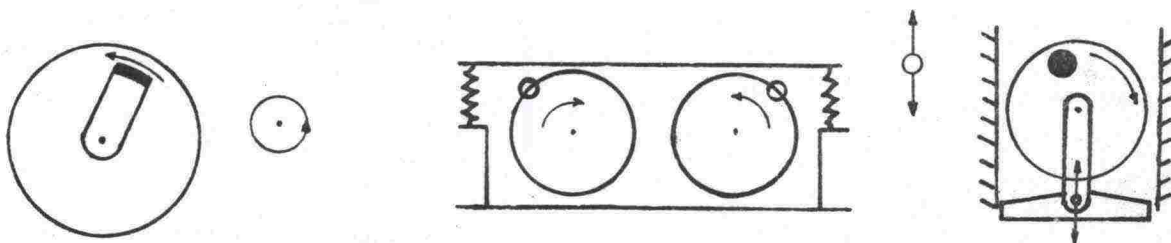


Löyhtymisen pääsyyinä on, että maa-aineksen kantavuus ylittää. Kitkamaalajien kantavuus on yleensä riittävä alaspäin suuntautuvaa voimaa vastaan, mutta pyörän liikkeestä johtuen, suuntautuu jo ohitettuun pisteeseen sivusuuntainen voima valssista. Kun kimmoinen maanpinta nousee, aiheuttaa se pystykomponentin, joka yhdessä valssin ylimenon jälkeen syntyvän pystyvoiman kanssa löyhdyttävät pintaa.



Kuva 7. Löyhtymisen aiheuttavien voimien jännityskuviot.

Mikäli maassa on hienoa ainesta, voi tämä sitoa rakeita kriittisenä hetkenä niin, ettei löyhtymistä tapahdu mainitavasti. Lisäksi täryliikkeen suunnalla tai tärykoneen rakenteella (vastapaino periaate) voidaan estää löyhtymistä. Suunnatulla täryliikkeellä voidaan parantaa myös koneen syvyysvaikutusta.



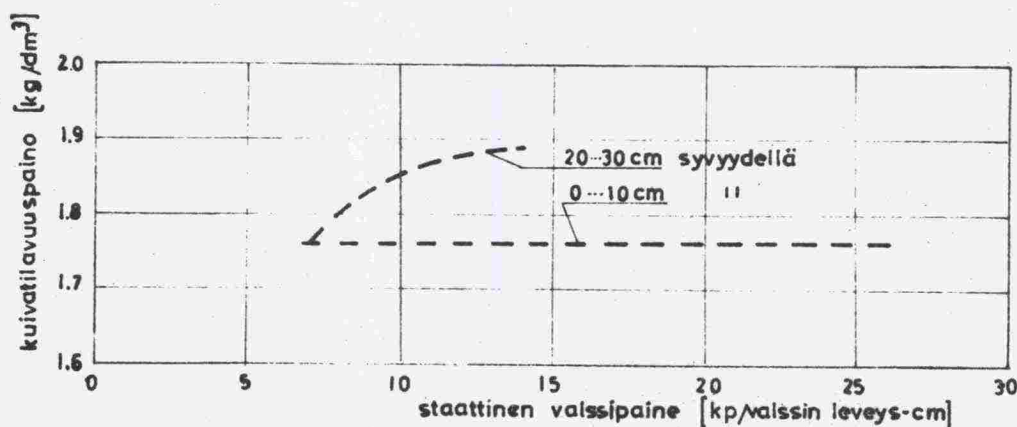
a) Ympyrän muotoinen täryliike

b) Suunnattu täryliike

Kuva 8. Täryliike

Löyhtymistä aiheuttaa myöskin liian pitkäaikainen, yhtämittainen jyrääminen, sillä se lisää materiaalin paineen johdavuutta, jolloin pinnan vastustuskyky sivulle ja ylöspäinkin suuntautuvia paineaaltoja vastaan heikkenee. Lisäksi pitkäaikaisissa jyräyksissä materiaali kuivuu, jolloin rakeita sitova veden näennäinen koheesio pienenee. Tällaisissa tapauksissa esiintyy materiaalin lajittumistakin, mikä edistää löyhtymistä pinnalla.

Epäkeskomassan suuruudella on merkitystä koneen syvyysvaikutukseen, mutta kerroksen pintaosan tiivistymiseen epäkeskomassan suuruudella ei liene merkitystä (kuva 9 ja 10).



Kuva 9. Täräjäjyrän staattisen valssipaineen vaikutus tiiviyteen

Mikäli jyrän painoa lisätään, on painon lisääminen jyrän runkoon edullisempaa kuin valssiin (täräyvoima vaimenee).

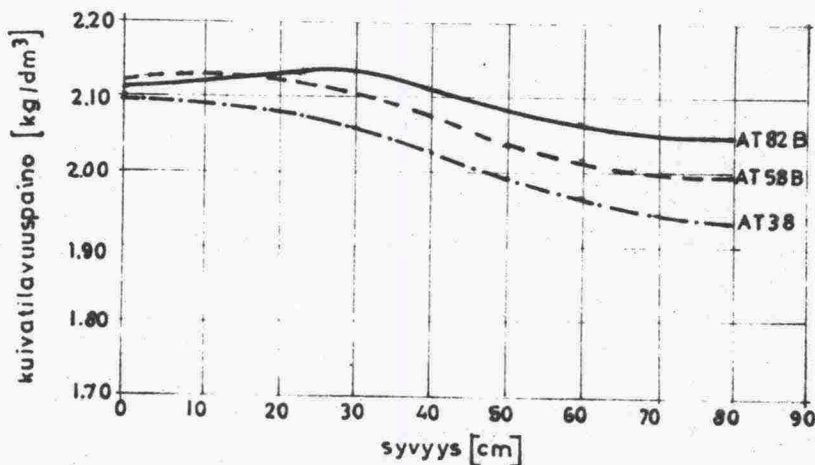
Materiaalin vaikutus tiivistymiseen ilmenee kuvasta 11. Siitä voidaan havaita, että täräjäjyrillä on karkeilla materiaaleilla syvemmälle ulottuva vaikutus (tosin niiden alkutiiviykskin suurempi).

Maalaji ei tosin yksinään vaikuta tiivistyvyyteen, sillä mm. rakeisuuskäyrän muodollakin on vaikutuksensa. Suhteellisesti suurin tiiviys saavutetaan ilmeisesti silloin, kun mate-

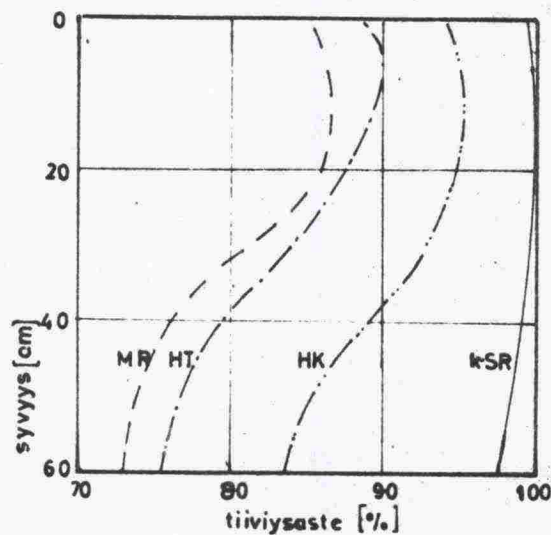
riaalin rakeisuuskäyrä noudattaa yhtälöä (Fuller)

$$p_1/p_2 = \sqrt{d_1/d_2}$$

ts. kun läpäisy-%:n suhde = vastaavien raekokosuhteiden neliöjuuri.



Kuva 10. Jyrän painon vaikutus kuivatilavuuspainoon hiekkakerrosta tiivistettäessä.

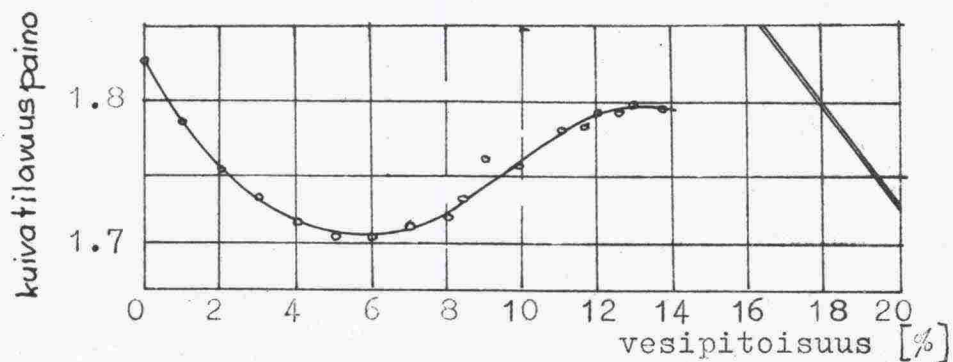


Kuva 11. Mr, Ht, Hk ja kSr:n tiivistyminen eri syvyyksillä (samalla työmäärällä).

## 2.2 Eri kerrosten tiivistäminen

### 2.21 Eristyskerros

Eristyskerros voidaan tiivistää joko eristyskerroksen päältä tai jakavan kerroksen päältä. Ensin mainitussa tapauksessa voi eristyskerroksen tiivistäminen 95 % proctor-tiiviyteen onnistua 1...2 jyräyskerralla (30 cm paksu kerros). Tiivistyminen riippuu kuitenkin hiekan kosteudesta (kuva 12).

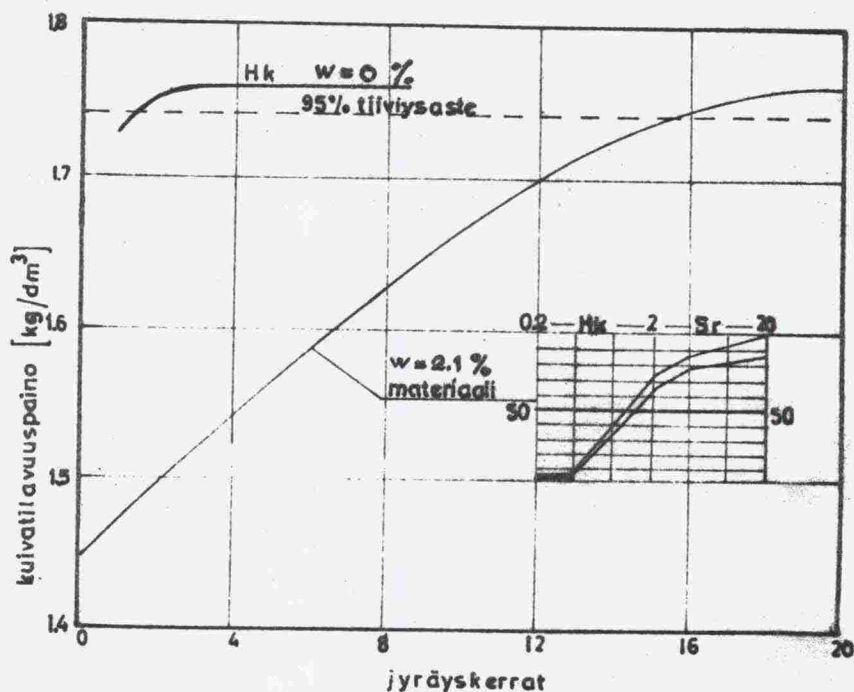


Kuva 12. Eristyshiekan kuivatilavuuspainon riippuvuus vesipitoisuudesta

Mikäli vesipitoisuus on välillä 4...8 % saa hiekan kuivatilavuuspaino minimiarvoja. Samalla työmäärällä, kun saavutetaan optimi- tai 0...1 %-vesipitoisuudessa 100 % tiiviys, saavutetaan tällöin ( $w = 4...8\%$ ) vain 94...95 % tiiviys. Olosuhteista riippuen voidaan tiivistystyömäärän lisäämisellä saada kuivatilavuuspaino yhtäsuureksi kuin pienellä työmäärällä optimivesipitoisuudessa.

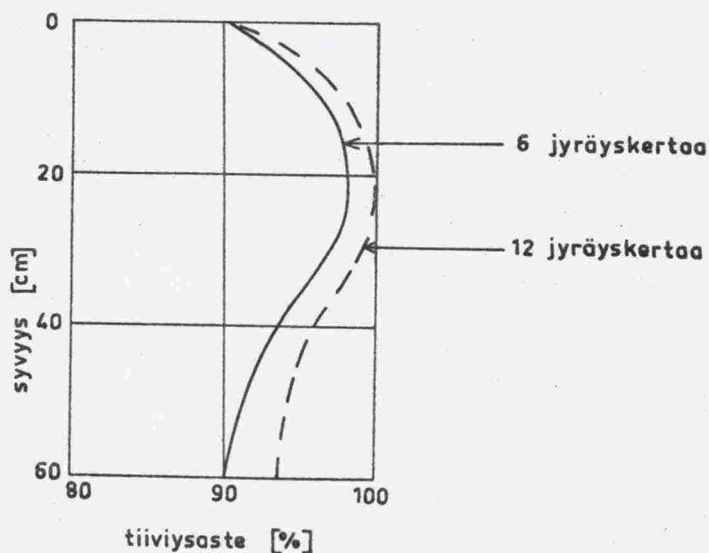
Kuvasta 13 voidaan havaita, että 50 cm paksun eristyskerroksen tiivistämiseksi tarvittiin 16 jyräyskertaa, kun materiaalin vesipitoisuus oli 2.1 % ( $w_{opt} > 15\%$ ), mutta kuiva-hiekka tiivistyi 2:lla jyräyskerralla.





Kuva 13. Vesipitoisuuden vaikutus eristyskerroksen tiivistystyömäärään.

Eristyskerroksessa ilmenee tärytiivistyksessä tiivein kohta yleensä n. 15...20 cm syvyydessä. Pinta saattaa usein jäädä irtonaiseksi, jolloin suoritetaan jälkitiivistystä ilman täryä (tai kumipyöräjyrällä).



Kuva 14. JT05:n syvyysvaikutus eristyskerroksessa eri tiivistystyömäärillä.

## 2.22 Jakavan ja eristyskerroksen samanaikainen tiivistäminen

Mikäli eristyskerrosta ei sen rakentamisvaiheessa tiivistetä riittävästi, tarvitaan tällöin jälkitiivistystä, mikä suoritetaan jakavan kerroksen päältä (kesällä). Kerrosten samanaikaisessa tiivistämisessä tulee tällöin olemaan ilmeisiä vaikeuksia. Kerrosten materiaalit poikkeavat usein suuresti toisistaan. Eristyskerroksen kastelu ei tästä syystä onnistune optimikosteuteen jakavan kerroksen päältä. Syinä tähän ovat mm.

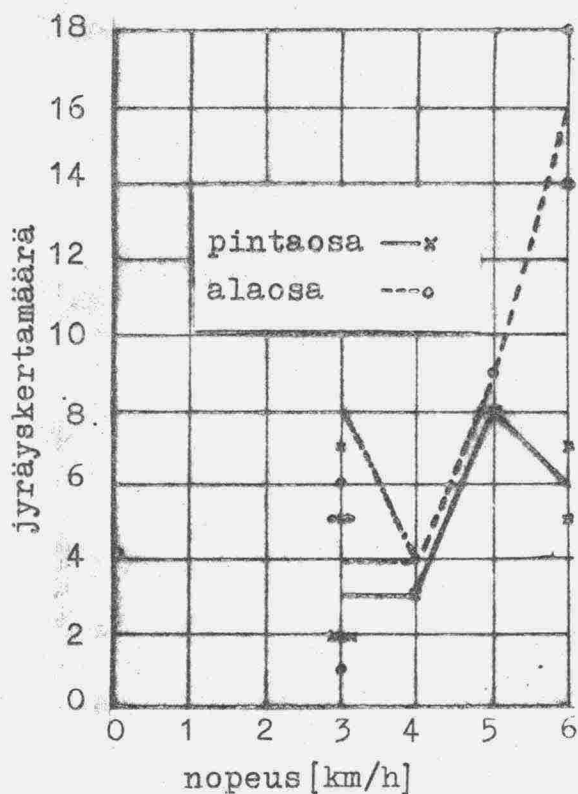
- eristyshiekan optimivesipitoisuus on suurempi kuin jakavan kerroksen kyllästysraja, mistä on seurauksena, ettei jakava kerros läpäise riittävästi vettä,
- eristyskerroksen veden pidätyskyky on huono, mistä on seurauksena, että vesi menee nopeasti kerroksen läpi va-luen alusrakennetta pitkin luiskiin.

Eristyskerroksen vesipitoisuus saattaa jäädä voimakkaasti kasteltunakin n. 4...8 % ( $w_{opt}$  yleensä > 10 %), jolloin hiekan kuivatilavuuspaino saa minimiarvoja. Tiiviyyttä on tällöin vaikea saada suurellakaan tiivistystyömäärällä nousemaan riittävästi.

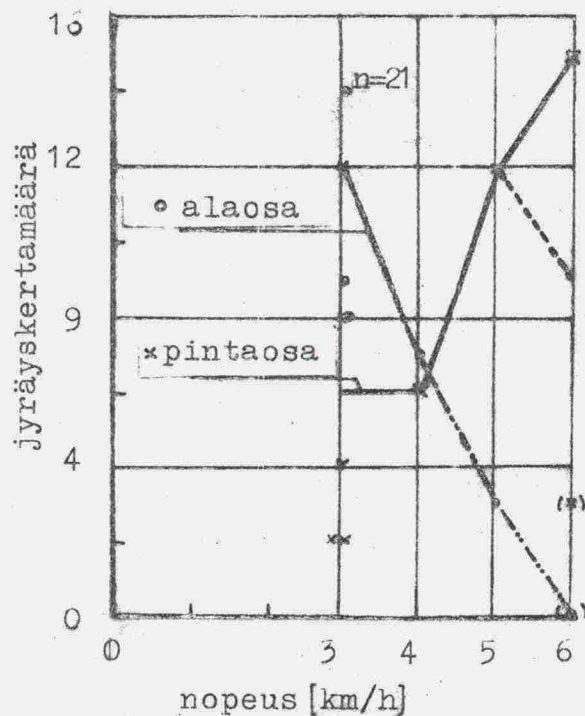
Koska kastelu ei ilmeisesti paranna eristyskerroksen tiivistyvyyttä tässä tapauksessa, on turhaa yrittää kastella eristyskerrosta jakavan kerroksen päältä. Tiivistys voidaan suorittaa luonnon kosteana.

Tutkimuksissa ilmeni, että jakavan kerroksen tiivistyminen yllä mainituissa tapauksissa riippui JT05 jyrättäessä kivisyydestä ja jyrän nopeudesta, mutta vähemmän eristyskerroksen tiiviyydestä ennen tiivistämistä sekä tuskin ollenkaan materiaalin kosteudesta (kuvat 15 ja 16).

Kuvasta 15 ilmenee, että edullisin jyräysnopeus JT05:lla lie-nee 4.0 km/h. Kivisyydellä ( $\neq$  > 64 mm) on melkoinen vaikutus tiivistystyömäärään (kuva 16).



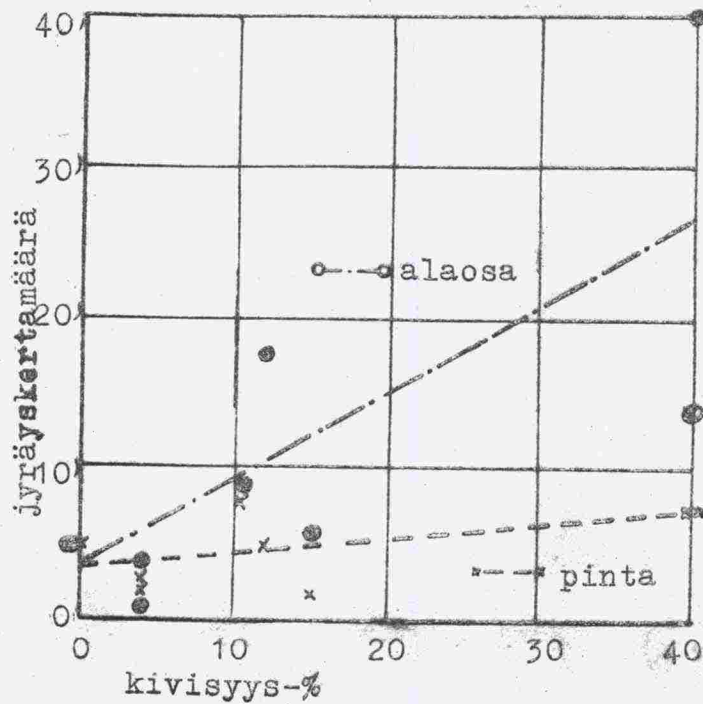
Kuva 15 a. JT05 nopeuden vaikutus jyräyskertamääriin jakavan kerroksen osalla.



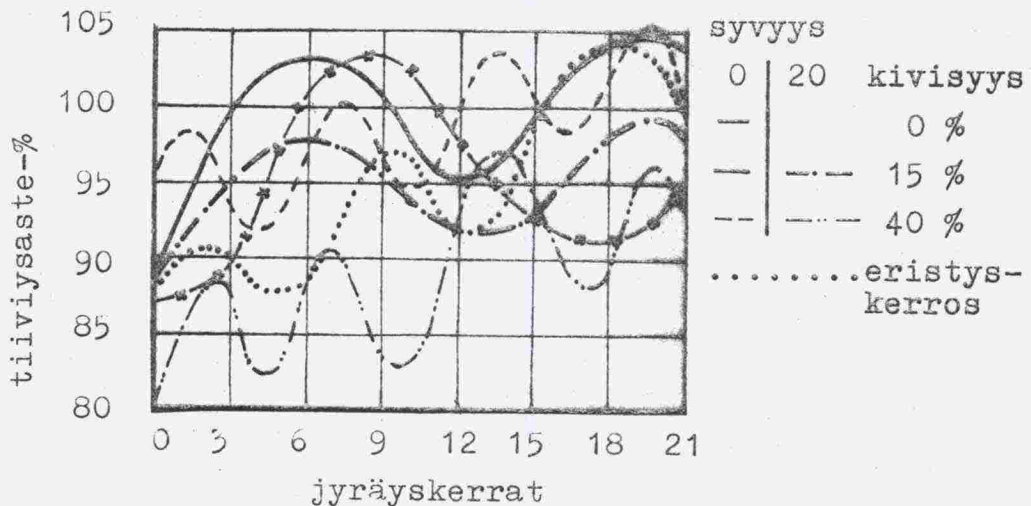
Kuva 15 b. JT05 nopeuden vaikutus jyräyskertamääriin eristyskerroksen osalla.

Kerrosten yht'aikaisen tiivistämisen vaikeutena on, että tiivistyminen eri kerroksissa noudattaa eri jaksoista aalto-liikettä. Jakavassa kerroksessa tiiviysastekäyrän aallon pituus riippuu materiaalin kivisyydestä siten, että kivisyyden kasvaessa 0...40 % "aallon pituus" vähenee n. 15...9 jyräyskertaan. Tällainen löyhtymis-tiivistymisilmiö johtuu em. löyhtymissyiden lisäksi erityisesti kivisissä materiaaleissa siitä, että rakenteessa tapahtuu muodonmuutoksia (murtumista, kivien sijoittumista eri asentoon, lajittumista jne.) tietyn kuormituskerran jälkeen. Eristyskerroksen "aallon pituus" sen sijaan tällaisessa tapauksessa pysyy suhteellisen vakiona, n. 8...9 jyräyskertaa. Tällöin on molempien kerrosten tiiviysastekerroissa vaikeaa saada yht'aikaista maksimikohtaa. Usein joudutaankin tyytymään vain jommankumman kerroksen (yleensä jakavan) tiiviysastevaatimuksen täyttämiseen.



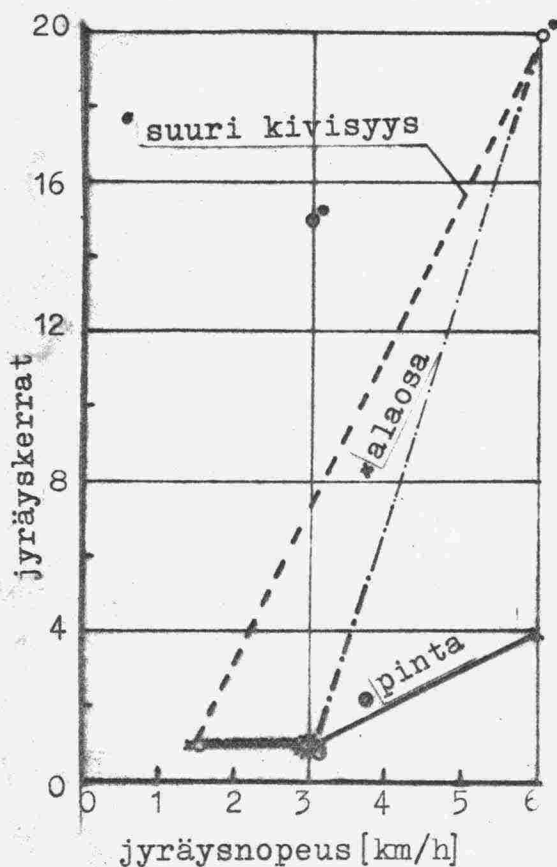


Kuva 16. Kivisyyden vaikutus JT05:n jyräyskertamääriin jakavan kerroksen tiivistyksessä.

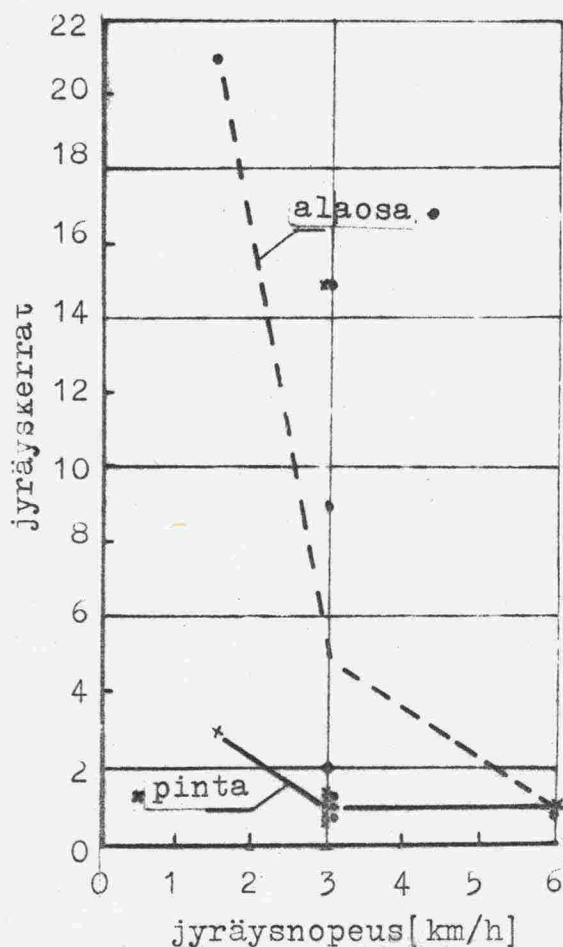


Kuva 17. Kivisyyden ja jyräyskertojen vaikutus tiiviysastekäyrään.

Raskaalla täryjyrällä JT07 jyrättäessä riippui tiivistystyömäärä ennen kaikkea jyrän nopeudesta, materiaalin kivisyydestä, materiaalin laadusta (murske vai luonnonsora) sekä eristyskerroksen alkutiiviydestä. Tiivistystyömäärän ei havaittu riippuvan oleellisesti jakavan kerroksen kosteudesta.



Kuva 18 a. JT07 nopeuden vaikutus jyräyskertamääriin jakavan kerroksen tiivistyksessä.



Kuva 18 b. JT07 nopeuden vaikutus jyräyskertamääriin eristyskerroksen osalla.

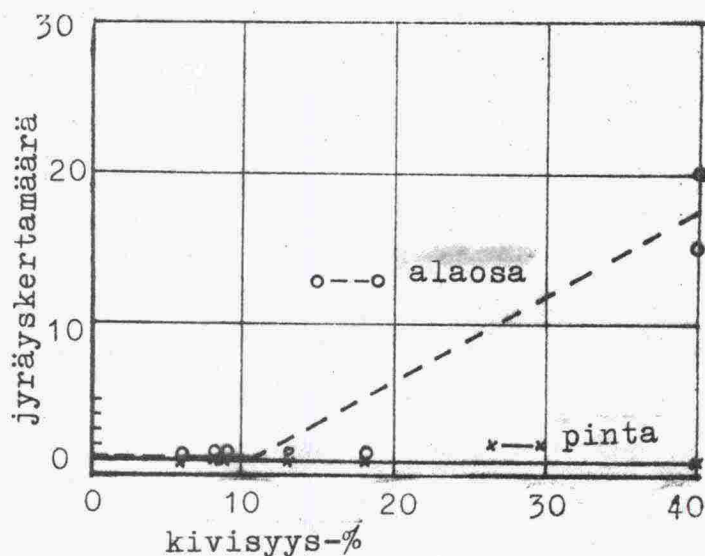
Edullisin jyräysnopeus jyräyskertamäärään nähden oli 3.0 km/h (kuva 18). Näitä tuloksia tarkasteltaessa on huomattavaa, että materiaalien erilaisuus häiritsi tutkimustuloksia

(ennen kaikkea kivisyys). Kivisyyden vaikutus jyräyskerta-  
määriin ilmenee kuvasta 19.

Eristyskerroksen alkutiiviiden ja kosteuden vaikutus ilme-  
nee taulukosta 2.

Eristyskerroksen alkutiiviys-%		Tarvittavat jyräyskerrat		w/w <sub>opt</sub> %	Jyräys- nopeus km/h
0...10 cm	20...30 cm	0...10 cm	20...30 cm		
98	100	0	0	5.3/14.3	6.0
108	92	0	2	5.3/9.4	3.0
95	88	0	9	6.6/11.0	3.0
95	93	0	15	4.9/9.3	3.0
92	88	3	21	3.7/9.3	1.5

Taulukko 2. Jyräyskertojen riippuvuus eristyskerroksen al-  
kutiiviudesta tiivistettäessä eristyskerrosta  
jakavan kerroksen päältä.



Kuva 19. Jakavan kerroksen kivisyyden vaikutus jyräysker-  
tamääriin (jyränä JT07).



Tiiviysastekuvaajan "aallonpituus" on n. 8 jyräyskertaa (6...9) luonnon soraisen jakavan kerroksen osalta. Murskesorassa on vastaava aallon pituus n. 9 (...12) jyräyskertaa. Kun eristyskerroksen tiivistymiskäyrä nousee ja laskee huomattavasti hitaammassa tahdissa, on jakavan ja eristyskerroksen yht'aikainen tiivistäminen vaikeata, varsinkin, jos jakavan kerroksen materiaali on soraa. Tällöin voidaan tarvita runsaasti tiivistystyötä (n. 15...30 jyräyskertaa), jotta molemmat kerrokset täyttäisivät laatuvaatimukset. Mikäli jakavan kerroksen materiaalina käytetään murskesoraa, voidaan molemmissa kerroksissa saavuttaa vaadittavat tiivistulokset jo 1...2 jyräyskerralla.

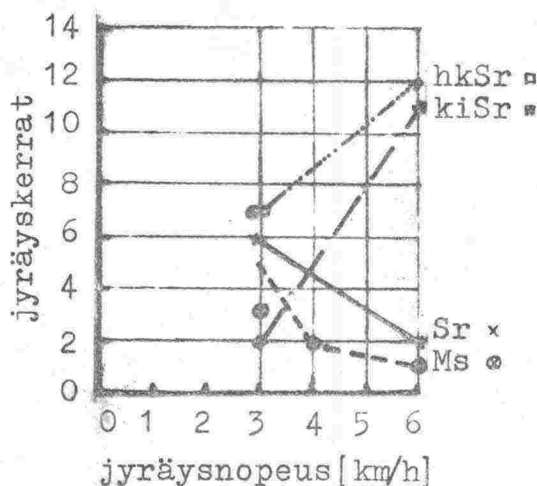
#### 2.23 Jakavan kerroksen tiivistäminen

Mikäli eristyskerroksen tiiviyydestä ei tarvitse välittää, voidaan jakavan kerroksen tiivistäminen suorittaa JT05:lla noin 3...5 jyräyskerralla nopeutta 3...4 km/h käyttäen (vrt. kuvia 15 ja 16). Raskaalla täryjyrällä JT07 vastaava jyräyskertamäärä lienee noin 1...5 jyräyskertaa nopeutta 3.0 km/h käytettäessä (vrt. kuvia 18 ja 19). Murskesoraa tiivistettäessä riittänee 1 jyräyskerta (alkutiiviyskin yleensä suuri). Murskesoran käyttöä puoltaa mm. se, että sen nopean tiivistymisen takia jyrän haitallinen vaikutus alempiin kerroksiin ei ehdi toteutumaan (mm. eristyskerroksen tiiviyydet säilyvät).

#### 2.24 Kantavan kerroksen tiivistäminen

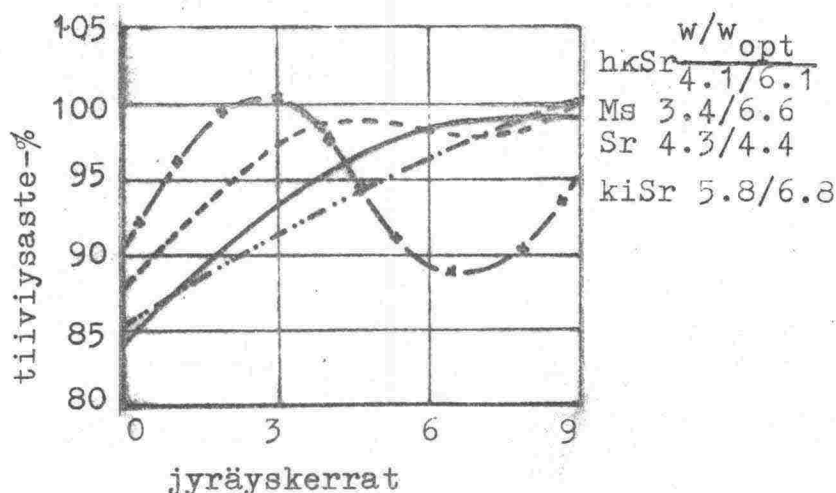
Keskiraskaalla täryjyrällä JT05 tiivistettäessä kantavaa kerrosta voidaan tiivistymistä tarkastella lähinnä koneen nopeuden, materiaalin laadun ja kosteuden sekä alkutiiviyyden funktiona, koska kantavan kerroksen alustana on yleensä kantava ja tiivis jakava kerros.

Jyräysnopeuden vaikutus jyräyskertamääriin eri materiaaleilla ilmenee kuvasta 20. Tässä suhteessa edullisin jyräysnopeus lienee kuvan mukaan n. 3...4 km/h kiSr tai hkSr:lla, mutta tavallisella Sr:lla ja Ms:lla tiivistyminen tuntuu paranevan nopeuden kasvaessa (...6 km/h).



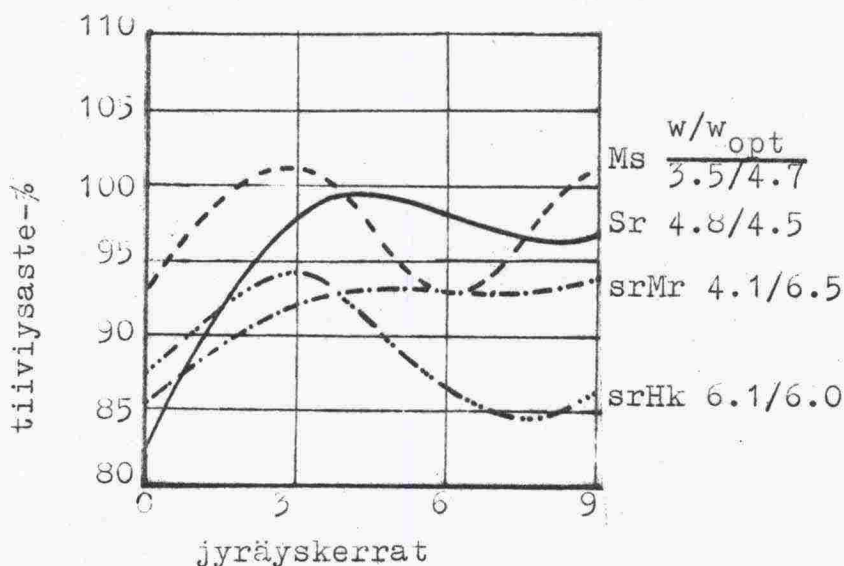
Kuva 20. Jyräysnopeuden vaikutus jyräyskertoihin eri materiaalien tiivistyksessä.

Kantavan kerroksen tiivistyminen noudattelee kuvien 21 ja 22 mukaisia käyriä. Niissä ilmenee materiaalin laadun ja jyräysnopeuden vaikutus käyrän muotoon.



Kuva 21. Materiaalin vaikutus kantavan kerroksen tiiviysastekäyrään, kun jyräysnopeutena oli 3.0 km/h.





Kuva 22. Materiaalin vaikutus kantavan kerroksen tiiviysastekäyrään, kun jyräysnopeutena oli 6.0 km/h.

Vaikka JT05:lla saadaankin kantava kerros suhteellisen helposti vaadittavaan kuntoon, on tällöin kuitenkin vaarana, että alemmat kerrokset ovat löyhtyneet jyräyksen aikana. Jottei tällaista esiintyisi, esitetään seuraavassa jyräyskertamääriä, joita noudattamalla muut kerrokset eivät ilmeisesti häiriinny liikaa (kantavan kerroksen materiaalin tulisi olla sellaista, että myöskin se tiivistyisi ao. jyräyskerroilla).

Jyräysnopeus 3.0 km/h

Ms :  $2 \leq n \leq 6$   
 Sr :  $1 \leq n \gg 9$   
 hkSr :  $3 \leq n \gg 9$   
 kiSr :  $\leq 9$

Jyräysnopeus 6.0 km/h

Ms :  $2 \leq n > 9$   
 kSr :  $1 \leq n \gg 9$   
 srHk :  $1 \leq n \gg 9$   
 kiSr :  $n \leq 9$

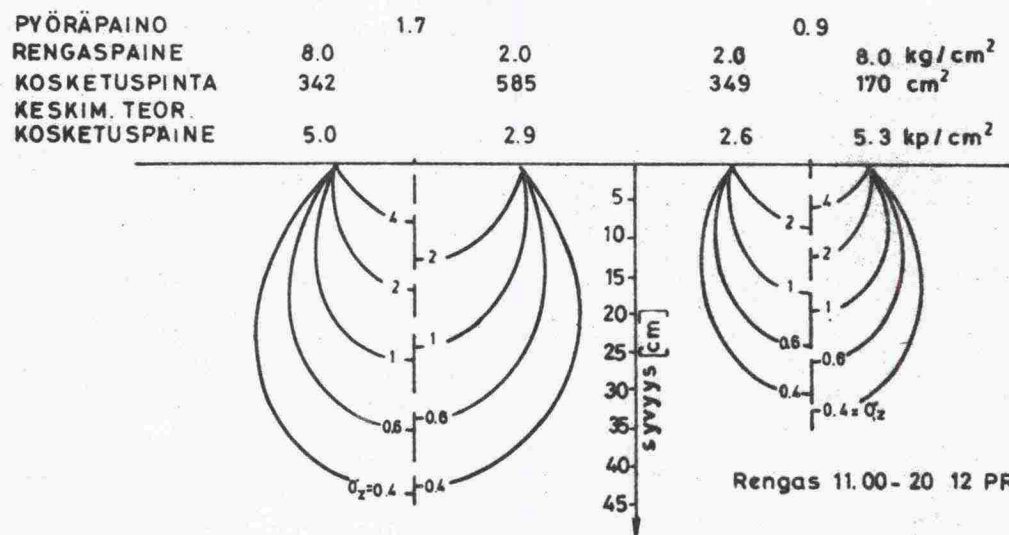
### 3. TIIVISTÄMINEN KUMIPYÖRÄJYRÄLLÄ

#### 3.1 Yleistä

Kumipyöräjyrälle on ominaista vaivaava tiivistämistapa. Jyrän aikaan saama rasitus tielle muistuttaa raskaan autoliikenteen aiheuttamaa rasitusta. Näin ollen liikenteen aiheuttamat myöhäisemmät muodonmuutokset tien rakenteissa lienevät vähäisiä. Tiivistyminen tapahtuu tasaisesti silloin, kun jyrän pyörät ovat oskilloivia, jolloin ne mukautuvat maan pinnan epätasaisuuksiin ja jolloin ne tiivistävät myöskin pehmeät kohdat tasaisellakin pinnalla.

Kumipyöräjyrän tiivistysvaikutus riippuu pyöräpainosta, renkaan ilmanpaineesta, pyörien oskilloinnista, painon jakautumisesta pyörille ja kumirenkaan rakenteesta. Materiaalien tiivistymiseen vaikuttaa mm. jyräysnopeus, joka välillisesti voi vaikuttaa myöskin koneen ominaisuuksiin, mm. jyrän syvyysvaikutukseen.

Pyöräpainon vaikutus pystysuoraan puristusjännitykseen  $\sigma_z$  ilmenee kuvasta 23.



Kuva 23. Pyöräpainon ja rengaspaineen vaikutus pystysuoraan puristusjännitykseen  $\sigma_z$ .

Kuvasta 23 voidaan havaita, että jos pyöräkuorma tulee lähes kaksinkertaiseksi, niin pyörän syvyysvaikutus tulee noin puolitoista kertaiseksi, vaikka rengas- ja kosketuspaine pysyvät likimain vakioina. Pyöräpainon merkitys kerralla tiivistettäviin kerrospaksuuksiin nähden ilmenee taulukosta 4 (Banaschekin suosittelimat).

Tiivistettävän kerroksen paksuus cm	Pyöräpaino tn
30	1.4...1.7
50	2.2...2.5
70	4.0...4.5

Taulukko 4. Tiivistettävän kerroksen paksuuden riippuvuus pyöräpainosta.

Kumipyöräjyrä ei aiheuta pintakerroksen löyhtymistä kuten täryjyrä, mikä johtuu mm. pienemmästä pintapaineesta ollen säädettävissä rengaspaineella. Rengaspaineen vaikutus kosketuspinta-alaan ja näin ollen myös pintapaineeseen on merkittävä silloin, kun jyrän pyöräkuorma on vähäinen. Raskail-la jyrillä rengaspaineen vaikutus pintapaineeseen on vähäisempi. Renkaan koolla ja sen kosketuspinnan suuruudella ei myöskään tunnu olevan vaikutusta yli 15 cm syvyydessä olevaan jännitykseen (kuva 24).

Kumipyöräjyrän syvyysvaikutus onkin riippuvainen pääasiassa vain pyöräkuormasta. Vakiopyöräkuormalla rengaspaineen ja kosketuspaineen vaikutus alempien kerrosten jännitysten suuruuteen on mitättömän pieni. Pyöräkuorman kasvaessa rengaspaineen vaikutus suurenee erityisesti ohuehkoissa kerroksissa (kuva 25).



RENGAS		7.50-15	8.25-15	9.00-20	11.00-20	12.00-20	13.00-24
		10 PR	14 PR	12 PR	12 PR	14 PR	18 PR
PYÖRÄPAINO	P (tn)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
RENGASPAINE	pi (ik)	6	6	6	6	6	6
KOSKETUSPINTA	F (cm <sup>2</sup> )	322	290	296	380	355	370
KESKIM.TEOR.KOSKETUSPAINE	pk (kg/cm <sup>2</sup> )	5.0	5.5	5.4	4.2	4.5	4.3

Samansuuruisten pystysuorien puristusjännitysten ( $\sigma_z$  kg/cm<sup>2</sup>) syvyys kuormituspinnan alla

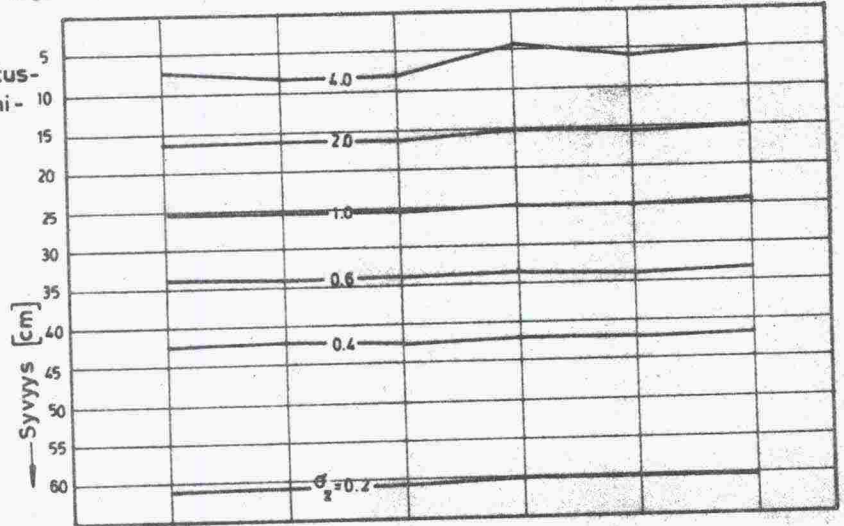
Olosuhteet:

Elastinen ja isotrooppinen alusta

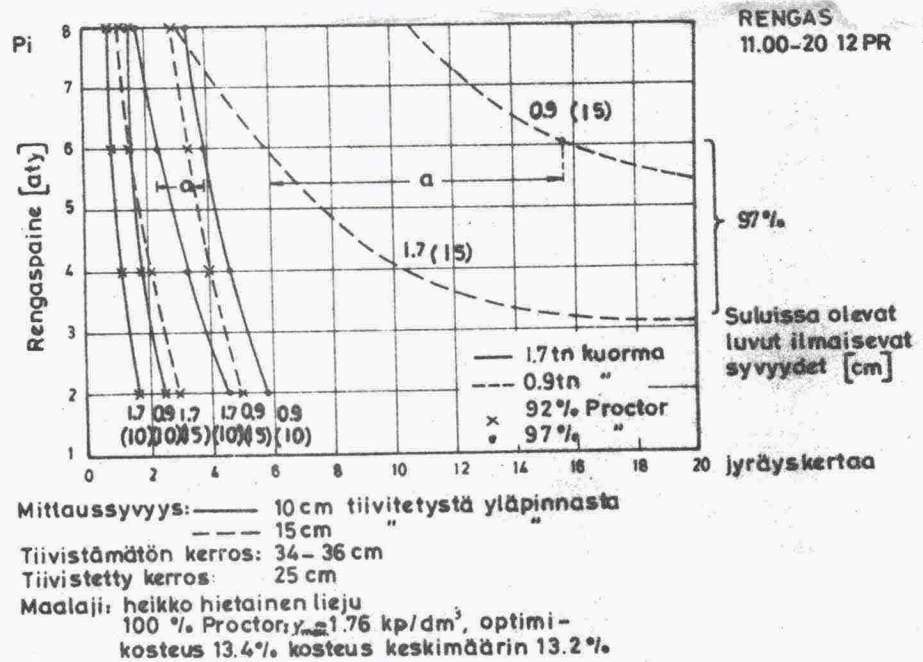
Konsentraatiofaktori 3

F ympyrä

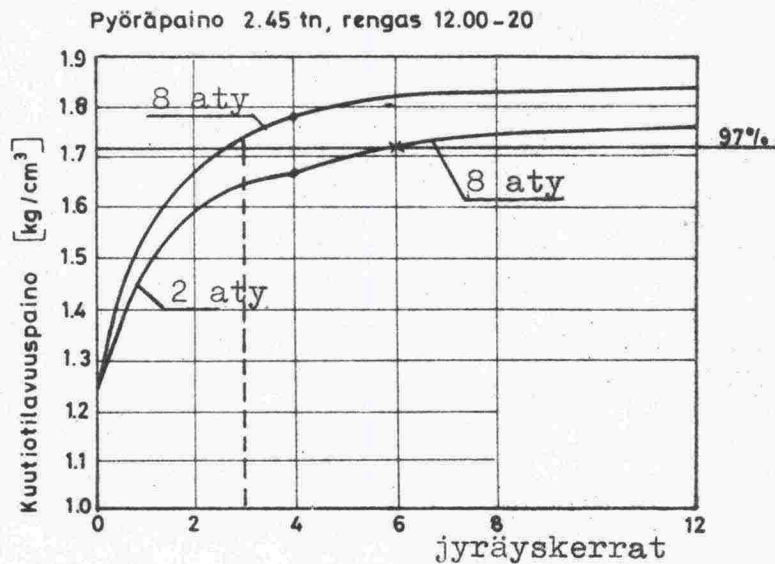
$P_k$  vakio alalla F



Kuva 24. Syvyysvaikutuksen riippuvuus renkaan koosta.



Kuva 25. Rengaspaineen vaikutus jyräyskertamääriin.



Kuva 26. Rengaspaineen vaikutus jyräyskertamäärään ohuen 15 cm paksun hietakerroksen tiivistyksessä.

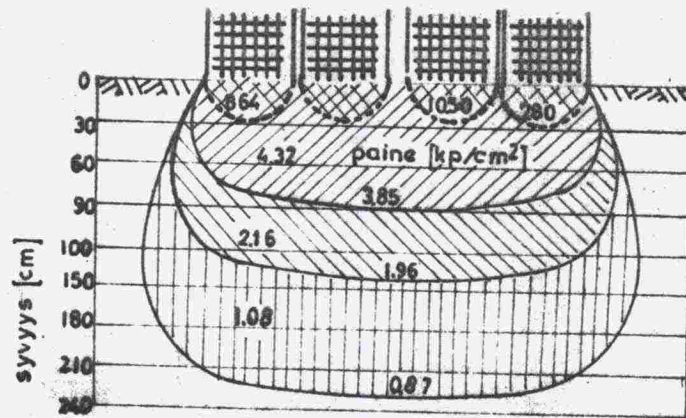
Ohuita (15...20 cm) kerroksia tiivistettäessä tulisi rengaspaineeseen kiinnittää huomiota jo jyräyksen alusta lähtien. Kuvan 26 esimerkkitapauksessa saavutettiin 97 %-proctor-tiiviys 3:lla jyräyskerralla, kun rengaspaine oli alusta lähtien 8 aty, mutta kun tiivistys suoritettiin siten, että ensimmäisellä 4:llä jyräyskerralla käytettiin rengaspainetta 2 aty ja sen jälkeen 8 aty, tarvittiin kaikkiaan 6 jyräyskertaa vastaavan tiiviyn saavuttamiseksi.

Jos jyrä korkeiden rengaspaineiden takia painuu syvälle löysään kerrokseen, on sillä vain edullinen vaikutus koko kerroksen tiivistymiseen nähden (mikäli jyrä vain pystyy liikumaan).

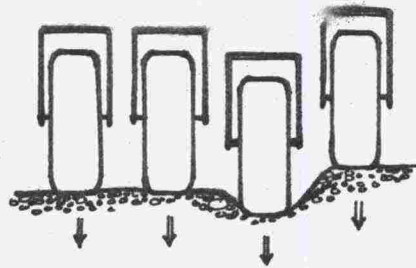
Jyrän pyörien lukumäärällä on merkitystä, paitsi kääntäen verrannollisesti pyöräpainoon nähden, myöskin jyrän aiheuttamaan kokonaispaineeseen nähden (suoraan verrannollisesti). Useiden renkaiden yhteisvaikutus ulottuu huomattavastikin syvemmälle kuin yksittäisen renkaan vaikutus (kuva 27).

Jyrän pyörien oskilloinnista on seurauksena, että voidaan "löytää" kerroksista heikohkot, löyhät kohdat, mikä ilmenee

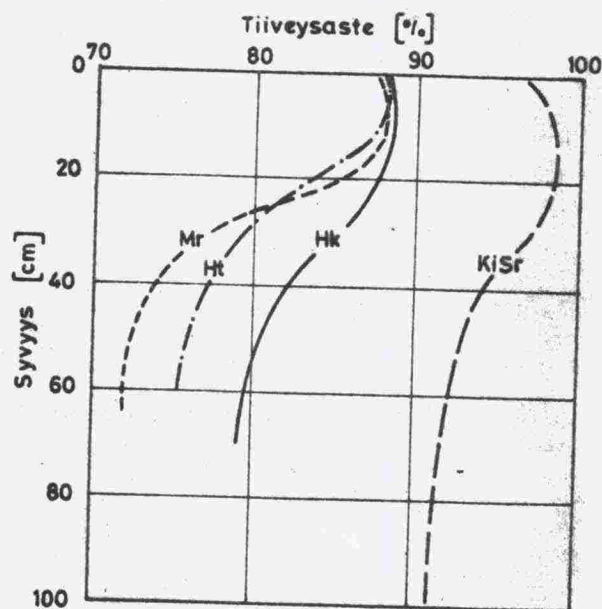
siten, että tasainen kerrospinta tulee kuoppaiseksi. Näin voidaan ehkäistä myöhäisempiä painumia tiessä. Esimerkiksi valssijyrillä tällaista ilmiötä ei voida aikaansaada.



Kuva 27. Usean pyörän aiheuttaman paineen jakautuminen hiekkakerroksessa.



Kuva 28. Kaaviokuva oskilloinnista.



Kuva 29. Kumipyöräjyrän syvyysvaikutus eri materiaaleissa. (Samalla tiivistystyömäärällä aikaansaadut).

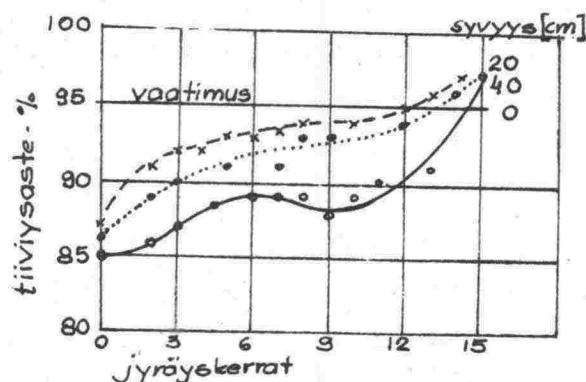


Kumipyöräjyrän suorittamalle tiivistykselle on ominaista, että tiivistyminen tapahtuu tehokkaimmin noin 5...20 cm syvyydessä materiaalista riippuen (kuva 29). Tämä johtunee siitä, että kerroksen pinnassa tapahtuu murtumista ja maa-aineksen liikehdintää.

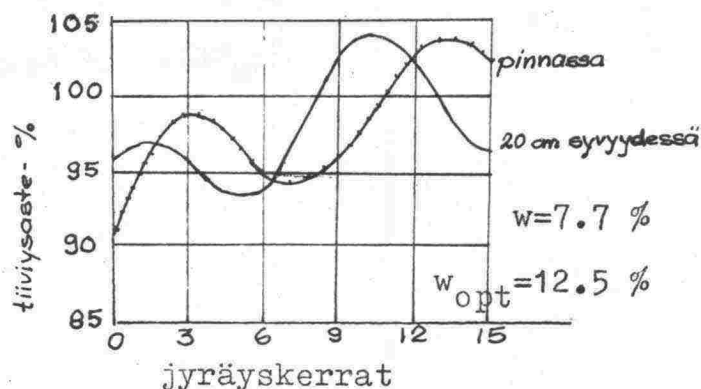
### 3.2 Eri kerrosten tiivistäminen

#### 3.21 Eristyskerroksen tiivistäminen

Eristyskerroksen tiivistystyömäärä riippuu mm. levityskoneesta ja maansiirtoautojen suorittamasta tiivistyksestä. Kevyen puskutraktorin PT04 suorittaman levityksen jäljiltä eristyshiekan tiiviys lienee noin 80...85 % proctor-tiiviyydestä. Tällöin tarvitaan n. 14 jyräyskertaa kumipyöräjyrällä JK20 40 cm paksun eristyskerroksen tiivistämiseksi (jyränopeus 3.0 km/h), (kuva 30). Mikäli eristyskerroksen levityksessä käytetään raskasta puskutraktoria PT 08 saattaa eristyskerroksen alkutiiviys olla noin 90...100 %. Tällöin riittää 0...2 jyräyskertaa vaadittavan 95 % proctor-tiiviyyden saavuttamiseksi, vaikka kosteus jäisikin hieman alle optimimäärän (kuva 31).



Kuva 30. Optimikostean eristyshiekan tiivistyminen, kun alkutiiviys on alhainen ( $v = 3.0$  km/h).



Kuva 31. Eristyshiekan tiivistyminen, kun alkutiiviys on korkea ( $v = 5.0$  km/h).

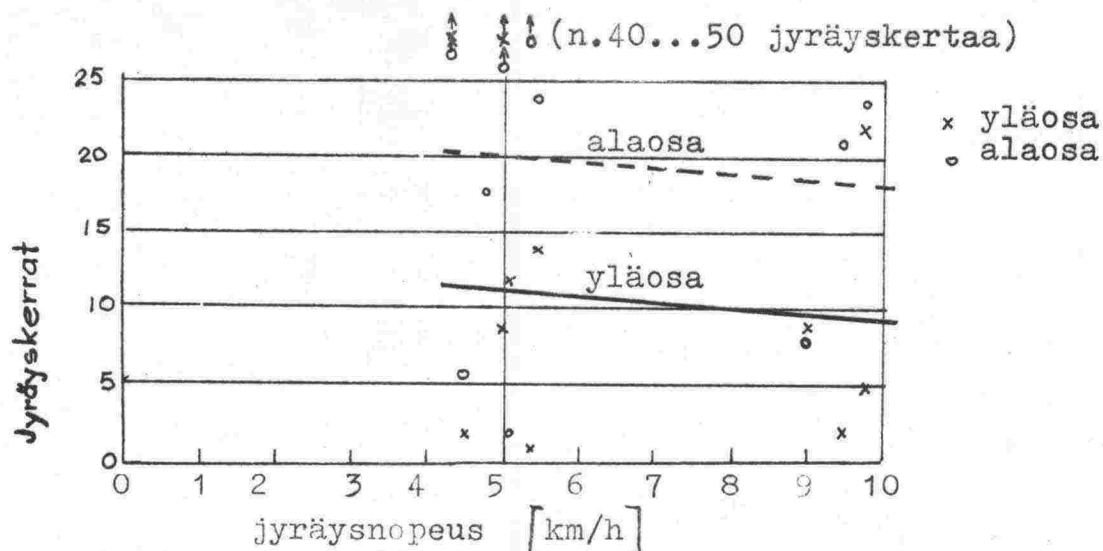
### 3.22 Eristys- ja jakavan kerroksen samanaikainen tiivistäminen

Kerrosten tiivistämiseen tarvittava työmäärä riippuu oleellisesti vallitsevasta tilanteesta. Mikäli eristyskerrosta ei ole sen rakentamisvaiheessa tiivistetty riittävästi, saat-  
taa sekä eristys- että jakavan kerroksen tiivistäminen olla vaikeaa. Eristyskerroksen kasteleminen riittävästi ei onnis-  
tu jakavan kerroksen päältä (vrt. kohta 2.12). Tosin näissä tutkimuksissa eristyskerroksen kosteudella ei tuntunut ole-  
van erityistä merkitystäkään, mikä johtui ilmeisesti siitä, että hiekan kuivatilavuuspainokäyrä on suhteellisen vaaka-  
suora.

Mikäli eristyskerroksen tiiviys oli alle 85 %-yksikön jyrää-  
miseen ryhdyttäessä, tarvittiin sen tiivistämiseen 95 % tii-  
viyteen keskimäärin 20 jyräyskertaa. Jyrän nopeuden tulisi  
tällöinkin olla suuri n. 8...10 km/h, jotta sillä olisi myös  
dynaamista tiivistämisvaikutusta. Alle 5.0 km/h nopeuksilla  
jyrättäessä tarvittiin toisinaan peräti 40...50 jyräyskertaa.

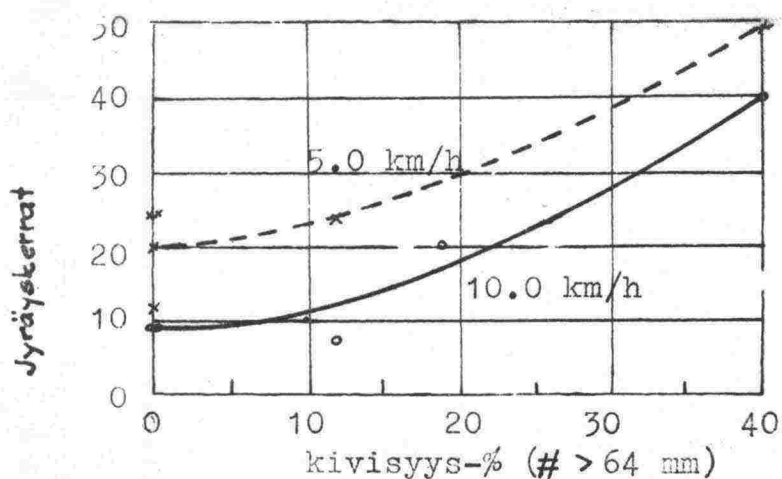
Jakavan kerroksen tiivistyminen riippui mm. materiaalin kivi-  
syydestä ja kosteudesta, jyräysnopeudesta sekä eristyskerrok-  
sen tiiviyydestä.





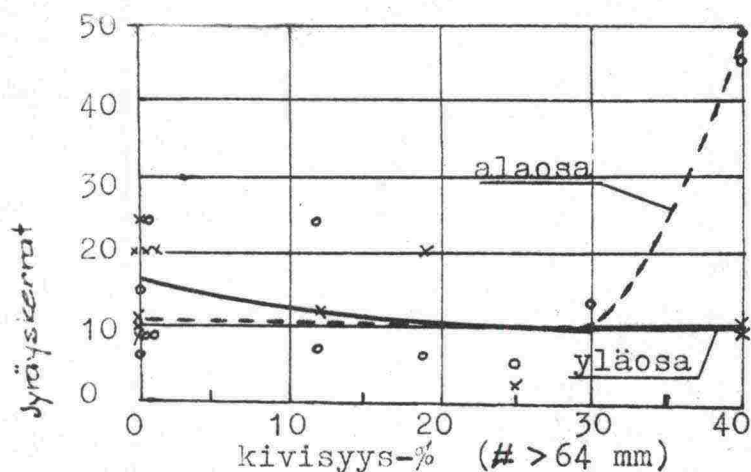
Kuva 32. Nopeuden vaikutus eristyskerroksen tiivistymiseen jakavan kerroksen päältä jyrättäessä (keskiarvokäyrät).

x 5.0 km/h  
o 10.0 km/h



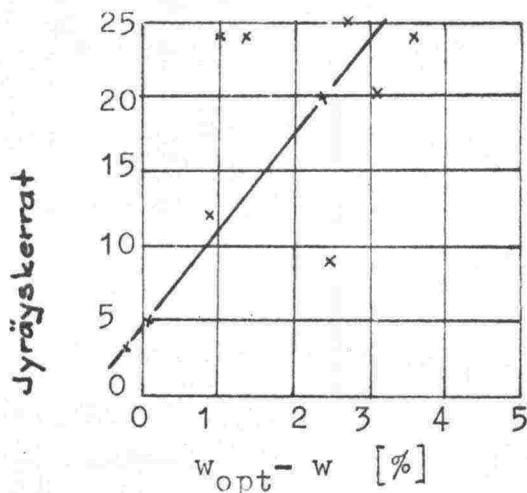
Kuva 33. Jyräyskertojen riippuvuus kivisyydestä ja jyräysnopeudesta (jakava kerros).

x yläosa  
o alaosa

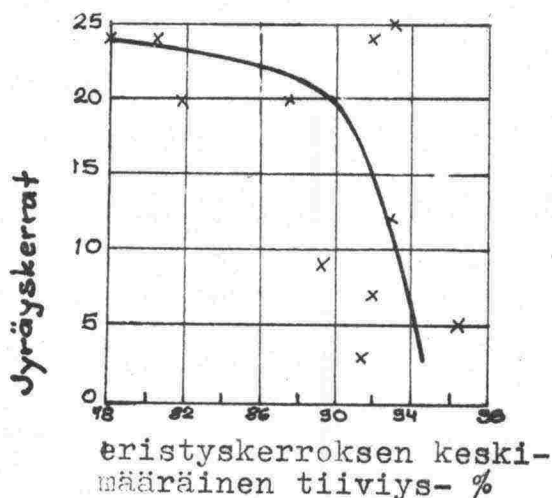


Kuva 34. Jyräyskertojen riippuvuus kerroksen pintaosan ja alaosan kivisyydestä.

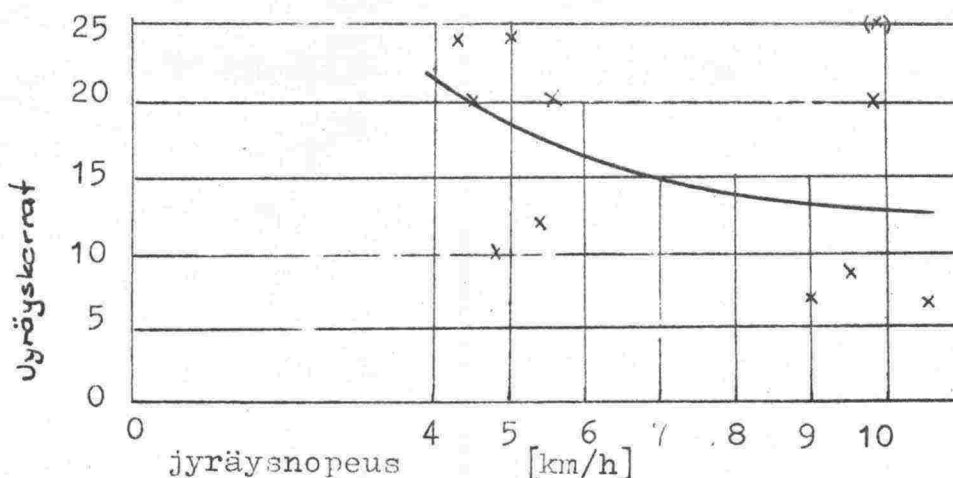
Kivisyyden noudstessa jakavan kerroksen alaosan tiivistämisiksi tarvittiin runsaasti jyräyskertoja. Tämä johtui ilmeisesti siitä, että materiaalissa tapahtui selvä lajittuminen. Kivien oli taipumus kerääntyä kerroksen alaosaan, jonne muodostui onkalorakenteita, joiden särkeemiseen kumipyöräjyrän teho ei aina riittänyt. Pintaosiin kerääntyneen hieon aineksen tiivistämisessä ei ilmennyt sanottavia vaikeuksia.



Kuva 35. Kosteuseron ( $w_{opt} - w$ ) vaikutus jyräyskertoihin.

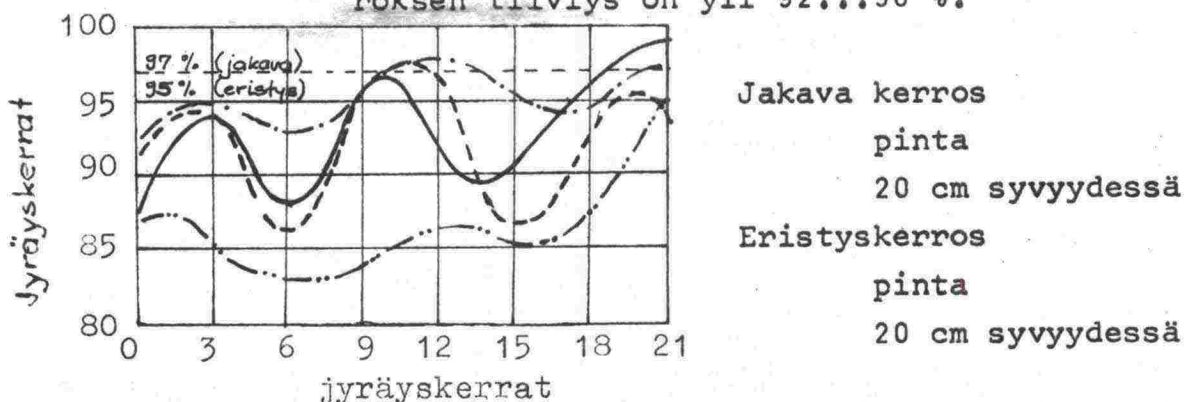


Kuva 36. Eristyskerroksen tiiviyyden vaikutus jakavan kerroksen tiivistymiseen tarvittaviin jyräyskertoihin.



Kuva 37. Nopeuden vaikutus jyräyskertoihin jakavan kerroksen tiivistyksessä.

Lopputoteamus: optimikostea, suhteellisen kivetön (<20 %) jakava kerros tiivistyy noin 3...5 jyräyskerralla kumipyöräjyrällä JK20 nopeutta 5...10 km/h käytettäessä, mikäli eristyskerroksen tiiviys on yli 92...96 %.



Kuva 38. Tiiviysastevaihteluja jakavassa ja eristyskerroksessa jyrättäessä jakavan päältä kumipyöräjyrällä.

### 3.23 Jakavan kerroksen tiivistäminen

Jakavan kerroksen tiivistämiseen on puututtu kohdassa 3.22. Tässä kohden voidaan kuitenkin olettaa, että eristyskerros on riittävän tiivistä ( $D > 95\%$ ). Jakavan kerroksen tiivistäminen riippui tällöin materiaalin rakeisuudesta, kosteudesta ja jyräysnopeudesta (rengaspaine 7 aty ja pyöräpaino oletetaan pysyvän vakioina, vrt. kuvia 33, 34, 35, 36, 37). Jakavan kerroksen tiivistämisessä on huomattavaa, että eristys-



kerros saattaa löyhtyä ajoittain, joten hyvän jakavan kerroksen materiaalin käyttö olisi välttämätöntä, jotta tiivistyminen tapahtuisi muutamalla jyräyskerralla.

### 3.24 Kantavan kerroksen tiivistäminen JK 20:llä.

Kantavan kerroksen tiivistyminen riippui ennen kaikkea materiaalin kosteudesta (optimivesipitoisuuteen nähden), mutta vähemmän jyräysnopeudesta.

nopeus km/h	$w - w_{\text{opt}}$ %	$D_n - D_0$ %	jyräys- kerrat	materi- aali
5.2	-1.2	9	9 (n)	hkSr
5.3	-1.7	10	6	hSr
5.4	+2.0	10	6	Sr
5.8	-2.0	9	(92%)9	MSr
9.4	-1.7	-1	4	MSr
9.8	-0.2	13	6	Sr
10.3	-1.4	11	6	hSr

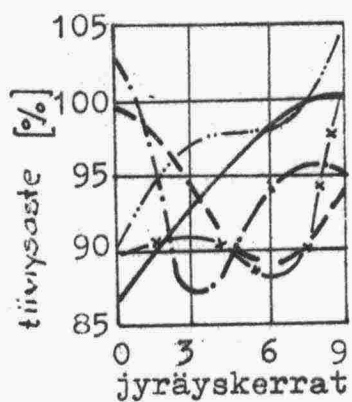
$$D_n = 97 \%$$

Taulukko 5. Tutkimustuloksia kantavan kerroksen tiivistämisestä JK 20:llä (rengaspaine 7 aty).

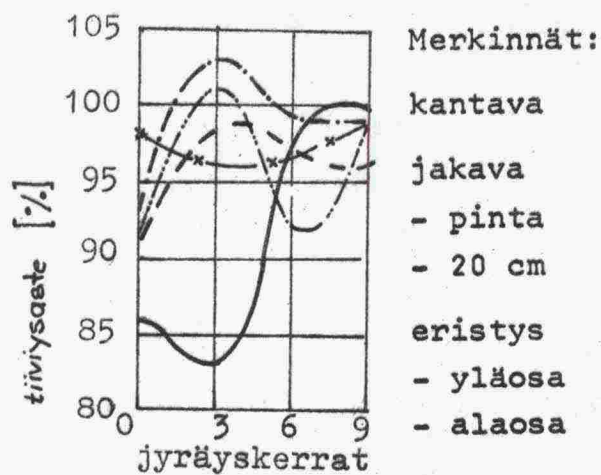
Taulukosta 5 voidaan havaita, että materiaalin vesipitoisuus ei saisi olla enempää 1.4 % alle optimin (mieluimmin yli), jotta kantava kerros tiivistyisi JK 20:llä nopeasti. Tällöin kantava kerros tiivistyi 6:lla jyräyskerralla jyräysnopeuden oltua 5....10 km/h.

Jakavan kerroksen osalta on huomattavaa, että mikäli sen tiiviysaste oli n. 98...103 %, alkoi se heti kantavan kerroksen jyräyksen alettua löyhtymään (kuva 39). Jos taas jakavan kerroksen tiiviysaste oli n. 90...92 % alkoi jakava kerros puolestaan tiivistyä kantavan kerroksen tiivistyksen alettua (kuva 40).





Kuva 39. Kantavan kerroksen  
päältä tapahtuva  
tiivistys (jakava  
kerros tiivistä)



Kuva 40. Kantavan kerroksen  
päältä tapahtuva  
tiivistys (jakavan  
kerroksen tiiviys  
90...92 %)

## 4. KANTAVUUS

Tienrakennuksessa todetaan tien rakenteen kantavuus tavallisesti kuormituksen ja sen aiheuttaman muodonmuutoksen avulla.

Jos maanpintaa kuormitetaan pistekuormalla  $P$ , aiheuttaa se siitä etäisyydellä  $r$  maanpinnassa painuman  $s$   
 $B o u s s i n e s q$  'in mukaan

$$s = \frac{P}{\pi E r} (1 - \mu^2) \quad (1)$$

missä

$s$  = painuma

$P$  = pistekuorma

$r$  = painuman etäisyys kuormittavasta voimasta

$E$  = muodonmuutosmoduli

$\mu$  =  $P o i s s o n$  'in luku

Kun pistekuorman asemesta käytetään kuormana jäykkää ympyrälevyä, saadaan integroimalla painumaksi

$$s = \frac{2 p a}{E} (1 - \mu^2) \quad (2)$$

missä

$a$  = levyn säde

$p = P/\pi a^2$  .

Kaavassa esiintyvä  $P o i s s o n$  'in luku riippuu mm. kuormituksen nopeudesta ja sen suuruudesta. Yleensä  $\mu$  on suuruudeltaan noin 0.3...0.4, mutta nopeassa kuormituksessa  $\mu$  lähenee arvoa 0.5, joka on sama kuin veden  $P o i s s o n$  'in luku ( $\mu = 0.5$ , silloin, kun materiaalin tilavuus ei muutu sitä kuormitettaessa). Kun  $\mu = 0.5$ , saadaan kaavasta 2

$$s = \frac{1.5 p a}{E} \quad (3)$$

Tavallisessa kenttätöössä lasketaan  $E$ -arvo kaavasta 4

$$E = \frac{254}{s} \quad (4)$$

joka saadaan kaavasta 3 sijoittamalla siihen arvot

$$a = 15 \text{ cm}$$

$$p = P / a^2 = 8000 \text{ kg} / \pi 15^2 \text{ cm}^2$$

Yleensä suoritetaan 2 peräkkäistä kuormitusta samasta kohdasta, jolloin saadaan kaksi E:n arvoa:  $E_1$  ja  $E_2$ . Lasketuista  $E_1$  - ja  $E_2$ -arvoista on viimeksi mainittu tärkeämpi kantavuuden mittauksissa. Ensimmäisen kokeen painumat ovat aina suurempia ja kuormitus-painumakuvaaja on yleensä epäsäännöllisempi kuin jälkimmäisen kokeen. Toisesta kokeesta lähtien painumat kitkamaassa vakioituvat tavallisesti siten, että jos samassa kohdassa vielä jatketaan kokeita painumat ja siten myös E-arvot muuttuvat enää varsin vähän (noin 1...5 %). Näin ollen voitaneen toisen suorituskerran tulosta ( $E_2$ ) pitää sopivana kantavuuden ilmaisijana.

Lisäksi lasketaan E-arvojen suhde  $E_2/E_1$ . Se ei saa olla tiettyä rajaa (tavallisesti 2.20) suurempi. Jos suhde ylittää sallitun rajan se osoittaa, että kuormituskokeet tiivistävät tutkimuskohtaa liian paljon ja että rakenteen varsinainen tiivistys on ollut liian pieni ennen koetta.

Levykuormituskokeen vaikutus ei ulotu kovin syvälle. Sen tehokas syvyysvaikutus on noin 1.5...2.0 x a (a = levyn säde). Käytännön kokeissa onkin todettu, ettei esim. eristyskerroksen tarvitse olla riittävän tiivistä ( $\geq 95$  %), jotta jakavan kerroksen (paksuus noin 35 cm) päällä suoritettu koe levyllä, jonka halkaisija on  $\emptyset = 30$  cm, näyttäisi riittävää kantavuutta.

Monikerroksellisissa penkereissä, missä materiaalin laatu vaihtelee, ei kaava (4) ole tarkka, koska E:n arvo vaihtelee eri materiaaleilla, kun taas em. kaava edellyttää E:n olevan ainevakio koko penkereessä. Esimerkiksi yksittäinen suuri kivi pinnan alla voi vaikuttaa tuntuvastikin tulokseen. Jos maaperässä on yli 150 mm kokoisia kiviä tai tutkitaan yli 40 cm paksuja kerroksia olisi käytettävä  $\emptyset 30$  cm suurempaa levyä, esimerkiksi  $\emptyset 45$  cm tai  $\emptyset 60$  cm. Tulosten käsittelyssä on tällöin otettava huomioon levyn koko.



Kysymykseen, mistä johtuu, että kantavuus ei ole riittävä, vaikka tiiviys täyttää asetetut vaatimukset, ei vielä lie-  
ne löydetty vastausta. Kysymykseen sisältyy kuitenkin epäilys, että ovatko tiiviys- ja kantavuusvaatimukset keskenään sopusoinnussa (vrt. kuva 41).

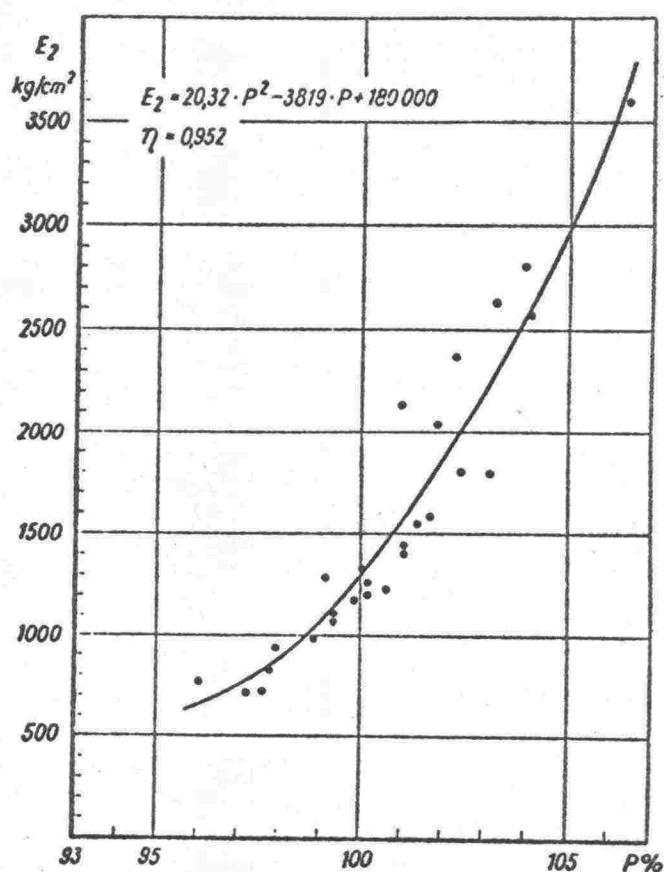
Yleensä on todettu E:n riippuvan erityisesti materiaalin raekoosta, raemuodosta, vesipitoisuudesta, kyllästymisra-  
jasta ja tiiviyydestä.

Tutkimuksissa saavutettiin kuvien 42, 43 ja 44 mukaiset tu-  
lokset. Täryjyrällä JT 07 (AT 82) saavutettiin vaaditta-  
vat kantavuusarvot  $E_2 = 1418 \text{ kp/cm}^2$  ja  $E_2/E_1 = 2.45$  (yksittäi-  
set koetulokset) 26:lla jyräyskerralla käytettäessä jyräys-  
nopeutta 3.0 km/h, mutta jyräysnopeutta 6.0 km/h käytettäes-  
sä ei vaadittuun kantavuuteen päästy 31 jyräyskerran jäl-  
keen. Tällöin tiivistämistä jatkettiin kumipyöräjyrällä  
JK 20 (AP 220), jolla saavutettiin 19:n jyräyskerran jälkeen  
riittävät kantavuusarvot  $E_2 = 1250 \text{ kp/cm}$  ja  $E_2/E_1 = 2.20$   
(jyräysnopeus 5.0 km/h).

Täryjyrällä JT 05 (AT 52) suoritettiin koe käyttämällä myös  
nopeuksia 3.0 km/h ja 6.0 km/h. Kummassakaan tapauksessa  
ei vaadittavia kantavuusarvoja saavutettu 21:n jyräyskerran  
aikana. Koetta jatkettiin sen jälkeen kumipyöräjyrällä  
JK 20, jonka jyräysnopeus oli 5.0 km/h. Koekentässä, jossa  
tiivistystä oli suoritettu JT 05:lla jyräysnopeutta 3.0 km/h  
käyttämällä, saavutettiin vaadittavat kantavuusarvot 20:n  
jyräyskerran jälkeen. Toisessa tapauksessa (alkutiiviys  
JT 05:lla jyräysnopeutta 6.0 km/h käyttäen) saavutettiin  
riittävä kantavuus 24:n jyräyskerran jälkeen.

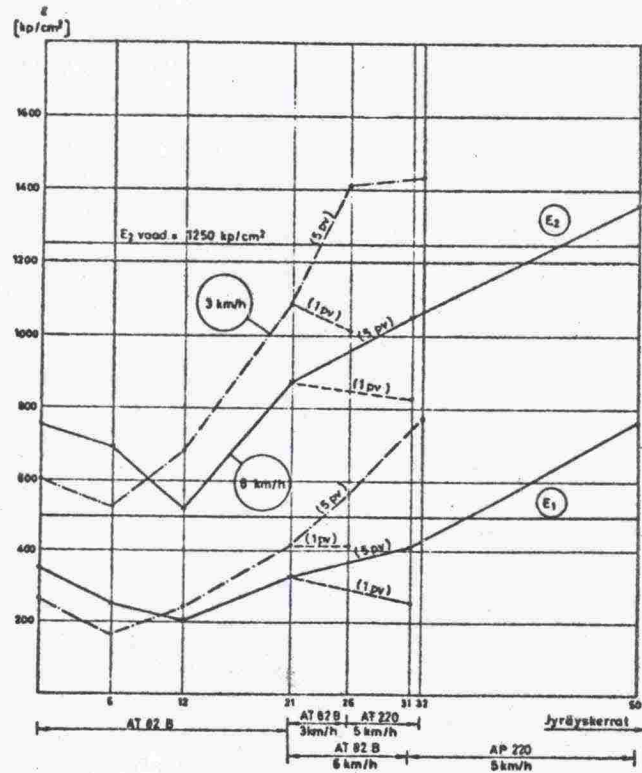
Kumipyöräjyrällä Lokomo AP 220 ei myöskään saavutettu riit-  
täviä kantavuusarvoja 21:n jyräyskerran aikana. Kuvasta 44  
aproksimoimalla saadaan, että JK 20:lla käytettäessä jyrä-  
ysnopeutta 5.0 km/h tarvittiin 48 jyräyskertaa ja jyräysno-  
peutta 10.0 km/h käytettäessä 45 jyräyskertaa vaadittavien  
kantavuusarvojen saavuttamiseksi.



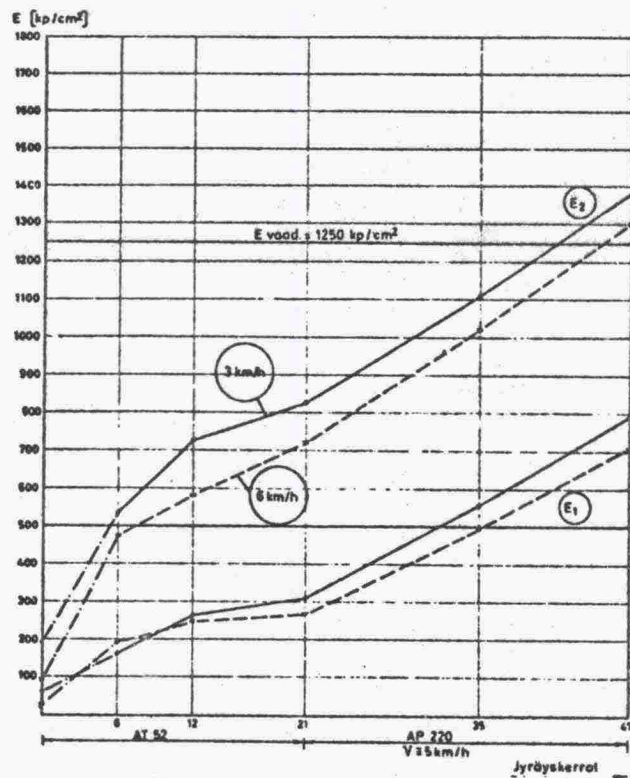


Kuva 41. Kantavuusluvun riippuvuus tiiviysasteesta eräillä Helsingin ympäristön vanhoilla teillä (Hk).

Levykuormituskokeesta todettakoon vielä, että olisi syytä tutkia materiaalin kosteus ennen koetta, koska kostealla maaperällä ei ilmeisesti päästä hyviin tuloksiin (ts. on suoritettu runsaasti liikatyötä, jos kostealla maaperällä on päästy riittäviin kantavuusarvoihin). Kastelun ja jyräyksen jälkeen tulisi pitää vähintään 2...4 vrk:n pituinen väliaika ennen levykuormituskoea, jotta maa ehtisi kuivua ja sen sisäinen lujuus palautua. Kokeissa kävi mm. ilmi, että kahdessa vuorokaudessa kosteus saattaa laskea jopa 4 %-yksikköä kuivalla säällä, jolloin  $E_2$ - arvo nousi 25...40 %.

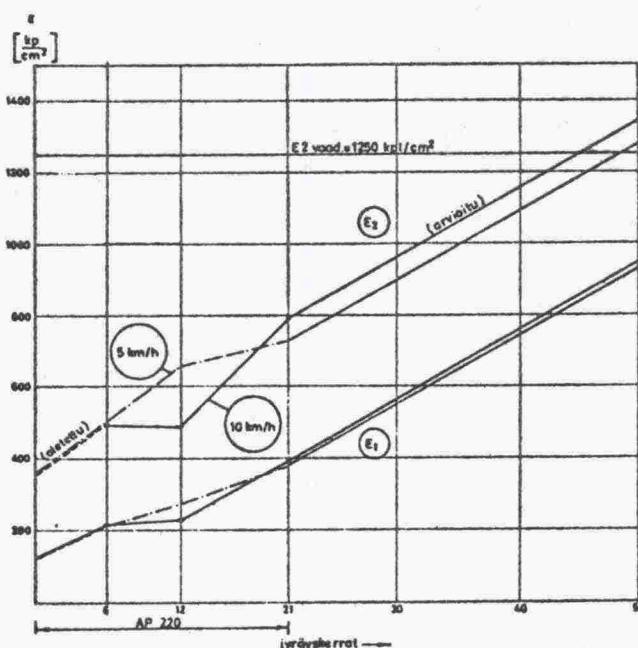


Kuva 42. Kantavuusluvut  $E_1$  ja  $E_2$  jyräyskertojen ja jyräysnopeuden funktiona (jyränä JT 07).



Kuva 43. Kantavuusluvut  $E_1$  ja  $E_2$  jyräyskertojen ja jyräysnopeuden funktiona (jyränä JT 05).

Ilmiötä, että kantavuus olisi suorassa riippuvuussuhteessa tiiviyteen, ei näissä tutkimuksissa voitu havaita. Mikäli materiaalilla oli heikohko alkukantavuus, nousi kantavuusluku jatkuvasti jyräyskertojen lisääntyessä. Sen sijaan tiiviys nousi ja laski jaksottaisesti. Esimerkiksi täryjyrällä JT 05 saavutettiin riittävä tiiviys 13:lla jyräyskerroilla, kun taas riittävään kantavuuteen tarvittiin 45 jyräyskertaa.



Kuva 44. Kantavuusluvut  $E_1$  ja  $E_2$  jyräyskertojen ja jyräysnopeuden funktiona (jyränä JK 20).

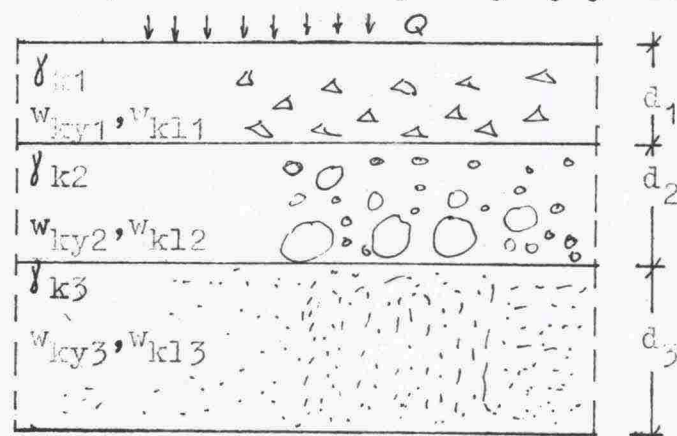
## 5. KASTELU

Kastelun merkitys materiaalin tiivistyksessä on huomattavan suuri. Kastelu on kuitenkin varsin kallista, joten turhaa kastelua tulisi välttää. Teoreettisesti kasteluun käytettävä vesimäärä voidaan laskea sillä olettamuksella, ettei materiaali sido itseensä enempää vettä, kuin mitä sen kyllästysraja osoittaa. Näin saadaan kerrosten kastelemiseksi kaava, jonka ilmoittamalla vesimäärällä on mahdollisuus saada vesipitoisuus yli optimimäärän

$$Q = 10 \sum_i (w_{ky} - w_{kl}) \times \gamma_k \times d \quad [l/m^2] \quad (5)$$

missä  $Q$  = kasteluun käytettävä vesimäärä  $[l/m^2]$   
 $w_{ky}$  = materiaalin kyllästysraja  $[\%]$   
 $w_{kl}$  = " kosteus ennen kastelua  $[\%]$   
 $\gamma_k$  = " kuivatilavuuspaino  $[kg/dm^3]$   
 $d$  = kerrospaksuus  $[m]$   
 $i$  = ko. kerros

Käytännössä eri kerrosten saman aikaisessa kastelemisessa ilmenee vaikeuksia, koska ylempi kerros on yleensä karkeampaa kuin alempi (esim. eristys- ja jakava kerros). Karkeamman aineksen kyllästysraja on tavallisesti suurempi kuin hienomman aineksen optimikohta. Tästä on seurauksena, ettei vettä valu riittävästi kerroksen läpi vaan vettä valuu myöskin pintaa pitkin sivuille. Näin ollen esimerkiksi eristyskerroksen vastaan ottama vesimäärä ei ole riittävä. Lisäksi eristyshiekan veden pidätyskyky lienee heikohko.



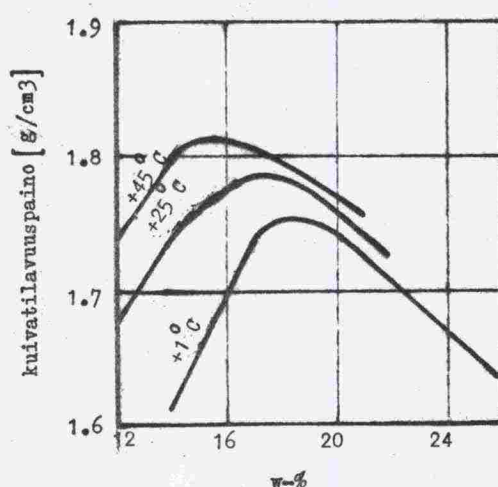
Kastelussa tarvittavia suureita.



## 6. TALVELLA TIIVISTÄMINEN

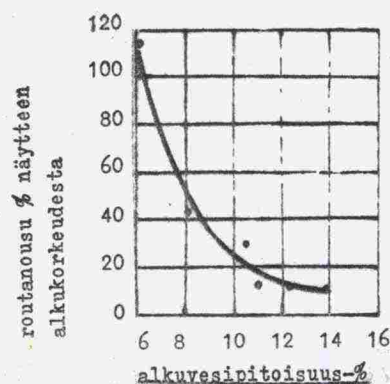
### 6.1 Yleistä

Lämpötilan ollessa yli  $0^{\circ}\text{C}$  saavutetaan kitkamaalajeilla yleensä maksimitilavuuspaino optimivesipitoisuudessa. Niiden suuruuteen on lämpötilalla kuitenkin merkitystä. Lämpötilan laskiessa maksimikuivatilavuuspaino pienenee ja optimivesipitoisuuskin muuttuu (pienenee tai suurenee).



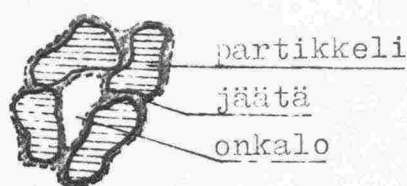
Kuva 45. Lämpötilan vaikutus  $\gamma_{\max}$ - ja  $w_{\text{opt}}$  arvoihin (hsHt).

Talvella ei optimivesipitoisuudella sinänsä ole merkitystä, mutta materiaalin kosteudella on vaikutusta tiiviysarvoihin samoin kuin materiaalissa tapahtuvaan routimiseen. Optimikosteutta suuremmilla vesipitoisuuden arvoilla routiminen on vähäisempää kuin tätä pienemmillä vesipitoisuuksilla.



Kuva 46. Routanousun suuruus % näytteen alkukorkeudesta (hsHk)

Pakkasolosuhteissa vettä sisältävän maa-aineksen ominaisuudet muuttuvat (jäätyminen) siten, että sen työstettävyys huononee. Veden jäätyessä jää sitoo rakeita keskenään suuremmiksi raeryhmiksi. Kun vesipitoisuus lisääntyy, lisääntyy myös rakeita sitovan jääkerroksen paksuus, jolloin raeryhmien lujuusominaisuudetkin kasvavat ja tarvitaan enemmän tiivistysenergiaa.



Kuva 47. Jäätynyt raeryhmä

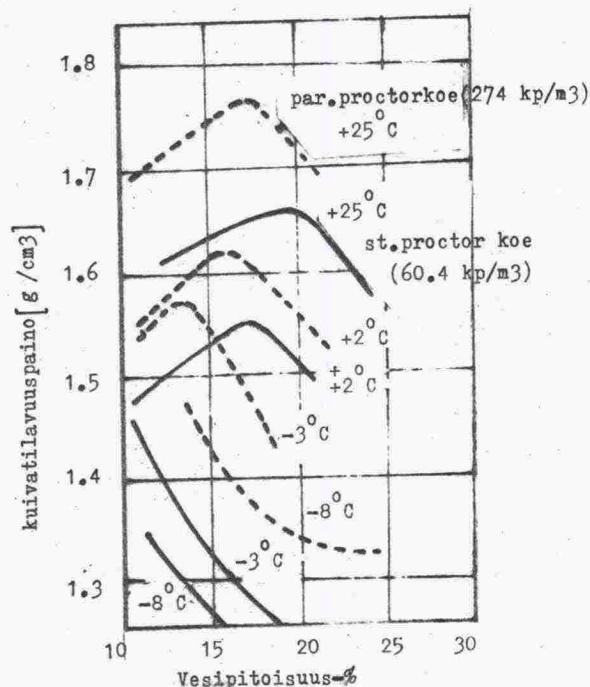
Raeryhmät sisältävät usein onkaloita, jolloin huokostilavuus pysyy suurena ja tiiviysaste jää pieneksi. Mikäli jyrä särkee tällaisia raeryhmiä, säilyy yksittäisten rakeitten ympäröimä jäävaippa kuitenkin. Samoin, jos tiivistys suoritetaan välittömästi levityksen jälkeen, saattaa kova pakkanen kiteyttää veden yksittäisten partikkelien ympärille, vaikkei varsinaista kerroksen jäätymistä pääsekään tapahtumaan, koska jyrä pitää materiaalin häiriintyneessä tilassa. Tällöin kerrosmateriaalista tulee murumaista, irtonaista ainesta, jota on vaikeata saada kestäväksi ja tiiviiksi siinä ajankohtana.

## 6.2 L ä m p ö t i l a n   j a   k o s t e u d e n   v a i - k u t u s   k u i v a t i l a v u u s p a i n o o n

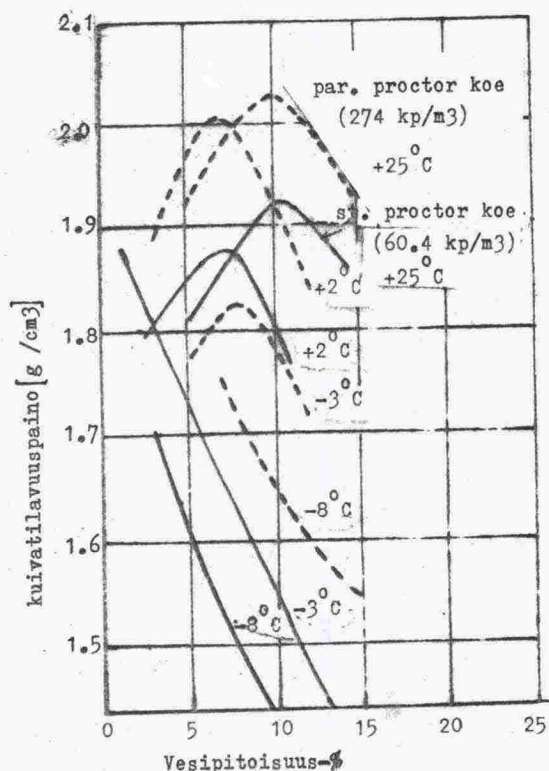
Lämpötilan ja kosteuden vaikutus kuivatilavuuspainoon ilmenee kuvista 48 ja 49.

Kuvista voidaan havaita, että vielä pakkaspuolella ( $t = -3^{\circ}\text{C}$ ) ilmenee tiivistettäessä suuremmalla tiivistystyömäärällä tietyt  $\gamma_{\text{max}}$ - ja  $w_{\text{opt}}$ -kohdat. Kun materiaali on täysin jäätynyt-

tä, alenee sen  $\gamma$ -arvo, minkä suuruus riippuu materiaalin kosteudesta kääntäen verrannollisesti.

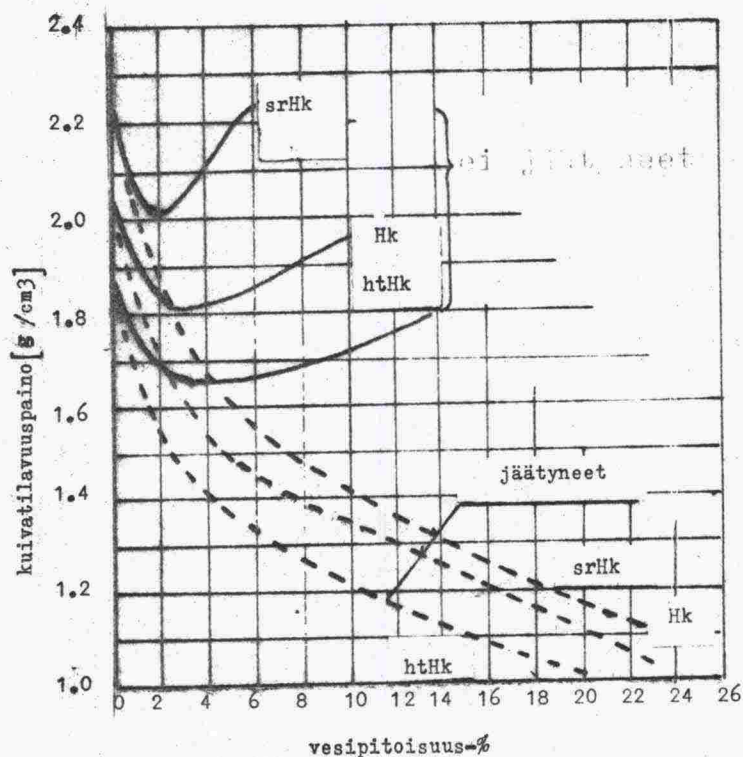


Kuva 48. Lämpötilan ja kosteuden vaikutus hHk:n kuivatilavuuspainoon.



Kuva 49. Lämpötilan ja kosteuden vaikutus srHk:n kuivatilavuuspainoon.

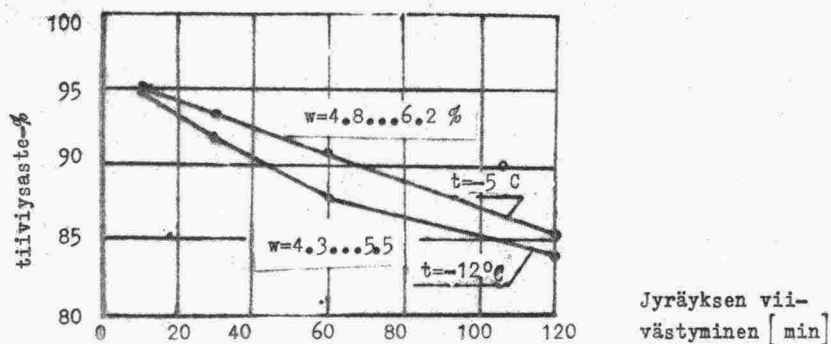




Kuva 50. Jättyneen materiaalin kosteuden vaikutus tiiviyteen.

### 6.3 Tiivistyksen ajankohda

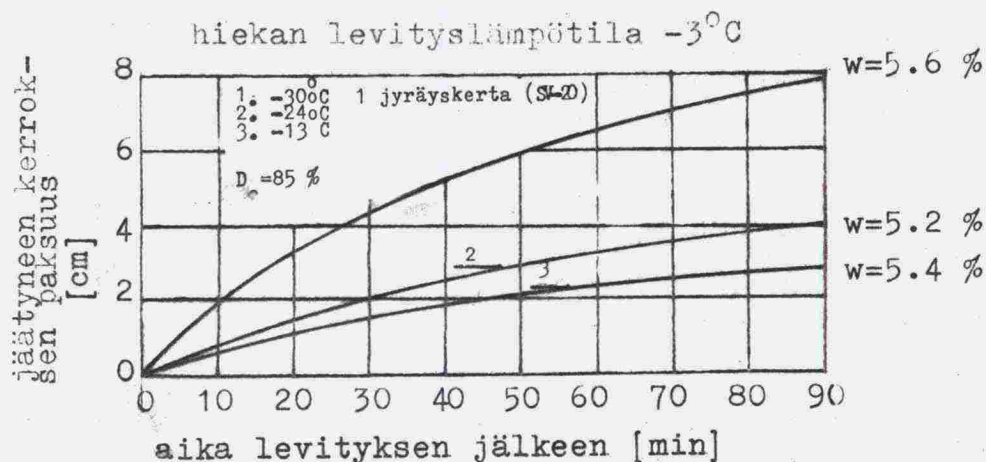
Pakkasolosuhteissa tulisi tiivistys suorittaa heti levityksen jälkeen (yksikköä kohti). Materiaalin jättyessä sen kuivatilavuuspaino alenee. Kuvasta 51 voidaan havaita, että tiiviysaste alenee voimakkaasti, kun jyräys viivästyy. Esimerkiksi samalla työmäärällä, millä 10 min. sisällä levityksestä saavutettiin hiekalla 95 % tiiviys saavutettiin 2 tunnin kuluttua levityksestä enää n. 85 % tiiviys.



Kuva 51. Tiiviysasteen riippuvuus jyräysajankohdasta levitykseen nähden.

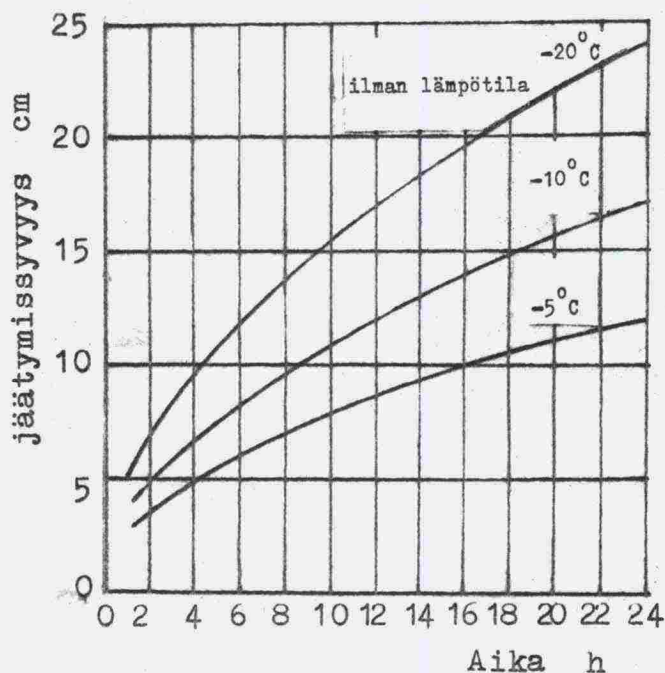


Tiivistys tulisi suorittaa melko nopeasti pintayksikköön nähden, sillä jyräyskertojen lisääntyessä materiaalin jäätymissyvyys ilmeisesti kasvaa (jäätyminen nopeutuu).



Kuva 52. Tiivistetyn ja tiivistämättömän materiaalin (hHk) jäätymissyvyyden riippuvuus levityksestä kuluneeseen aikaan nähden.

Kuvasta 52 ilmenee, että kertaalleen tiivistetyn materiaalin (hHk) jäätymissyvyys on noin kaksinkertainen tiivistämättömään nähden. Kuvasta 53 ilmenee lämpötilan ja ajan vaikutus Sr:n jäätymissyvyyteen.



Kuva 53. Lämpötilan ja ajan vaikutus soran jäätymissyvyyteen ( $w = 5\%$ ).

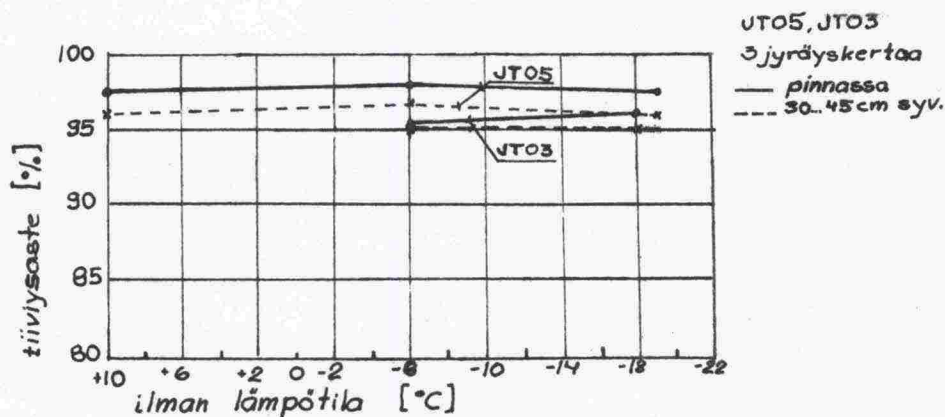
Kun tiivistettävän kerroksen pinta jäätyy (esim. levityskoneen jäljiltä n. 10 min. kuluttua jopa 2 cm paksuudelta) ei sitä enää ilmeisesti voida saada pakkasella tiiviiksi (jäätynee osalta), vaan materiaali jää irtonaiseksi. Jälkitiivistystä talvella on pidettävä täysin turhana. Tiivistys tulisi suorittaa lyhyinä pätkinä välittömästi levityksen jälkeen melko suurilla nopeuksilla edestakaisena liikkeenä. Koko tiivistyksen tulee edetä levityksen vauhdilla.

#### 6.4 Milloin kannattaa tiivistää

Pakkasolosuhteissa tiivistystulokseen vaikuttaa mm. ilman ja materiaalin lämpötila, materiaalin kosteus ja rakeisuus, tiivistyskone sekä ajankohta, milloin tiivistykseen ryhdytään.

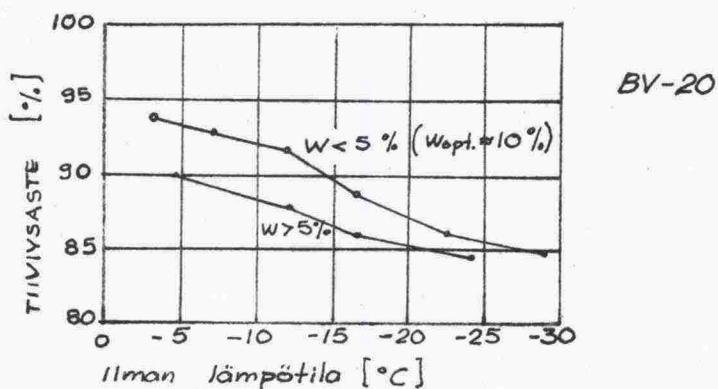
Mikäli materiaali on jäänyt ennen kuin tiivistämiseen on ryhdytty, on kuitenkin mahdollista saada materiaali riittävän tiiviiksi, ilman lämpötilasta huolimatta, edellytyksellä (kuva 56) että materiaalin kosteus on alle 1 %.

Jos tiivistys voidaan suorittaa täryjyrillä JT03 tai JT05 noin 3:lla jyräyskerralla (alle 10 minuutissa), ei ilman lämpötilalla ole ratkaisevaa merkitystä (0...-21°C). Tällöin on kuitenkin huolehdittava, ettei materiaali pääse jäätymään kuljetusvaiheessa.



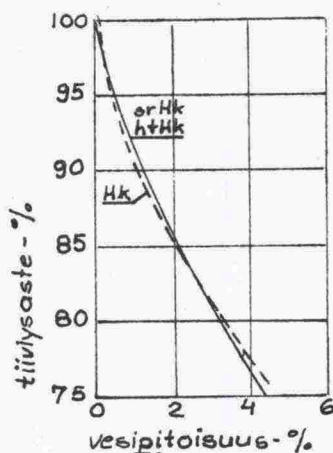
Kuva 54. Lämpötilan vaikutus tiiviysasteisiin.

Sen sijaan tärylevytiivistyksessä ilman lämpötilalla ilmeni vaikutusta (kuva 55).



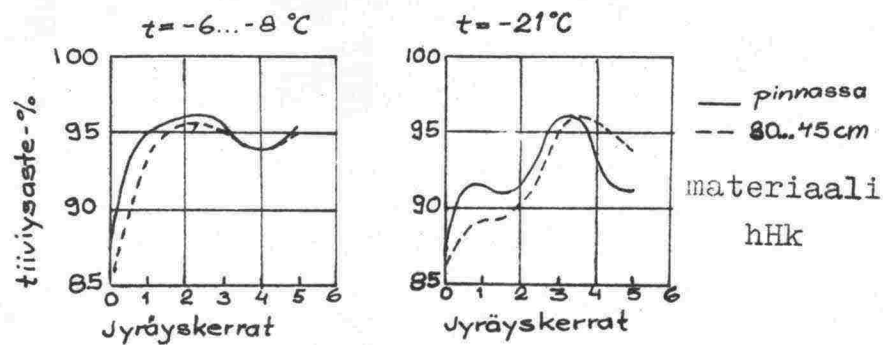
Kuva 55. Lämpötilan ja kosteuden vaikutus tärylevyllä suoritettuun tiivistykseen (hHk).

Raskaiden täryjyrien käyttö talvitiivistyksessä vaikuttaa edulliselta. Täryjyrien JT03 ja JT05 tiivistämisvaikutus ilmenee kuvista 57 ja 58 pakkasolosuhteissa. Hiekan tiivistyksessä sekä JT03 että JT05 kykenivät vielä kovassakin pakkasessa riittävään tiivistystyöhön ( $D \geq 95\%$ ).

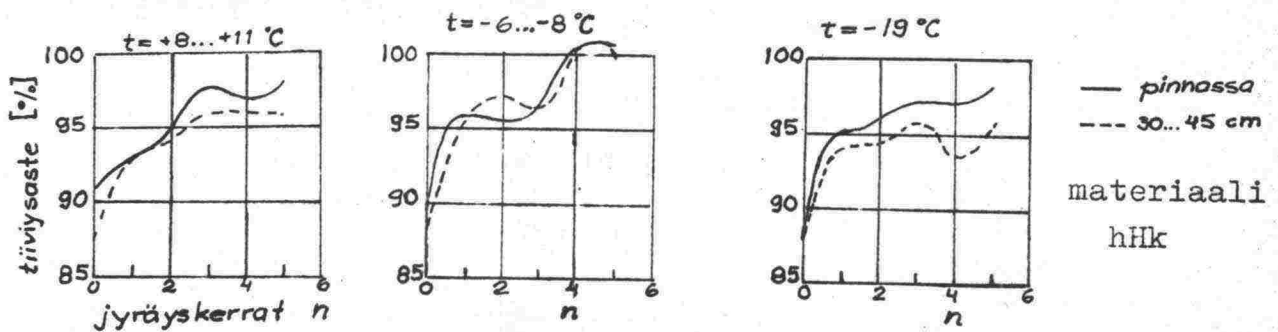


Kuva 56. Jäätäneen materiaalin kosteuden vaikutus lopputulokseen.





Kuva 57. Täräjäjyrän JT03 tiivistysvaikutus pakkasella.



Kuva 58. Täräjäjyrän JT05 tiivistysvaikutus (pakkasella ja lämpimällä säällä).

## 6.5 Tiivistyskoneen käyttö levityskoneena

Lähinnä kustannusten alentamiseksi ja kerrosten rakentamisprosessin nopeuttamiseksi on kehitetty menetelmä, missä TANA-kumipyöräjyry (varustettuna puskulevyllä) suorittaa materiaalin levityksen ja tiivistyksen samanaikaisesti. Menetelmällä voidaan tiivistää materiaali välittömästi maansiirtoauton tyhjennettyä lastinsa, millä seikalla on tiettyjä etuja erityisesti pakkasolosuhteissa.

Jyry suorittaa tiivistyksen heti, jolloin materiaali ei ehdi jäättyä.



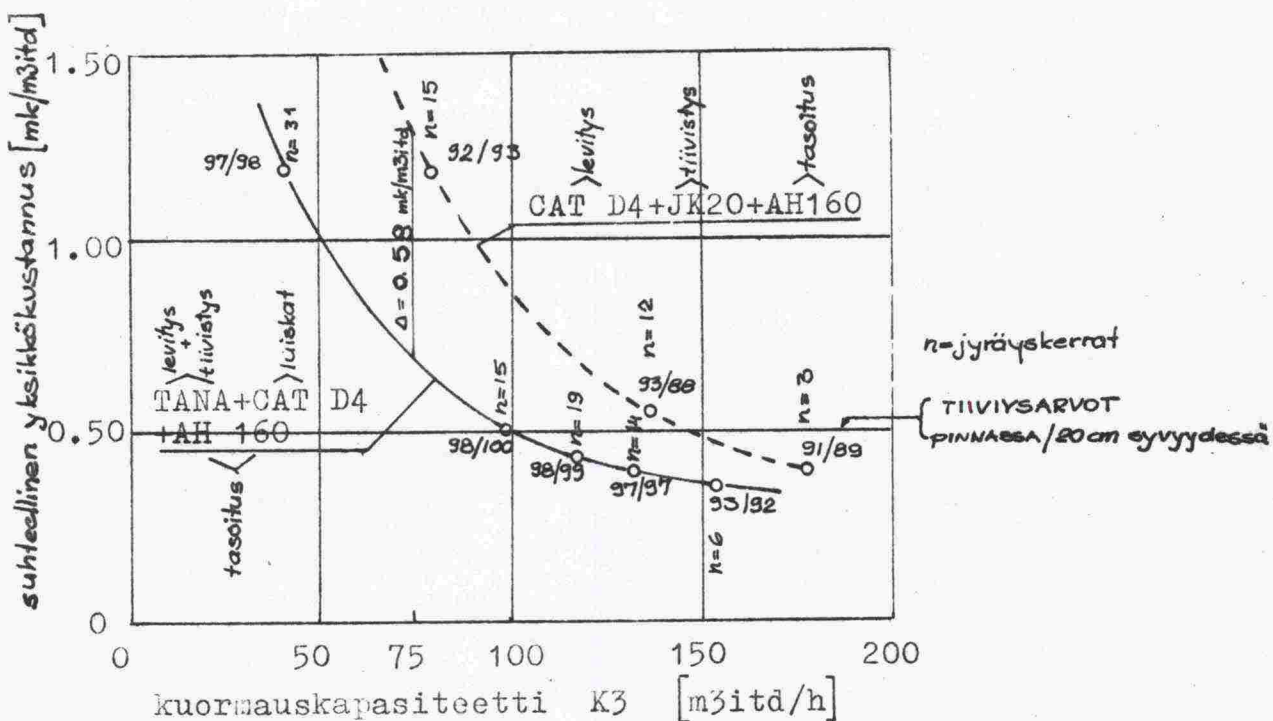
Tiivistys pintayksikköön nähden suoritetaan nopeasti, jolloin jyräyksen edistämää jäätymistä kerroksessa ei pääse tapahtumaan.

Kerros etenee kiilamaisesti, jolloin kiilan kärki tulee erityisen tehokkaasti tiivistetyksi (kova alusta).

Jyrien ja levityskoneiden välistä "kitkaa" ei esiinny. Työmaaliikenteen aiheuttamaa haittaa tiivistyskoneille (päältä pengerryksessä) ei tässä tapauksessa ole yli 8 m leveissä teissä. Tiivistystyömäärä riippuu vain kuormauskapasiteetista. Keskimääräisillä kuormauskapasiteeteilla jyräyskerat nousevat useisiin kymmeniin (30...50).

Jälkitiivistystä ei ilmeisesti kesällä tarvita.

Yksikkökustannuksissa säästö on huomattava (n. 0.30...0.60 mk/m<sup>3</sup>itd). Menetelmä soveltuu eristys- ja jakavan kerroksen sekä hienohkon pengermateriaalin rakentamiseen.



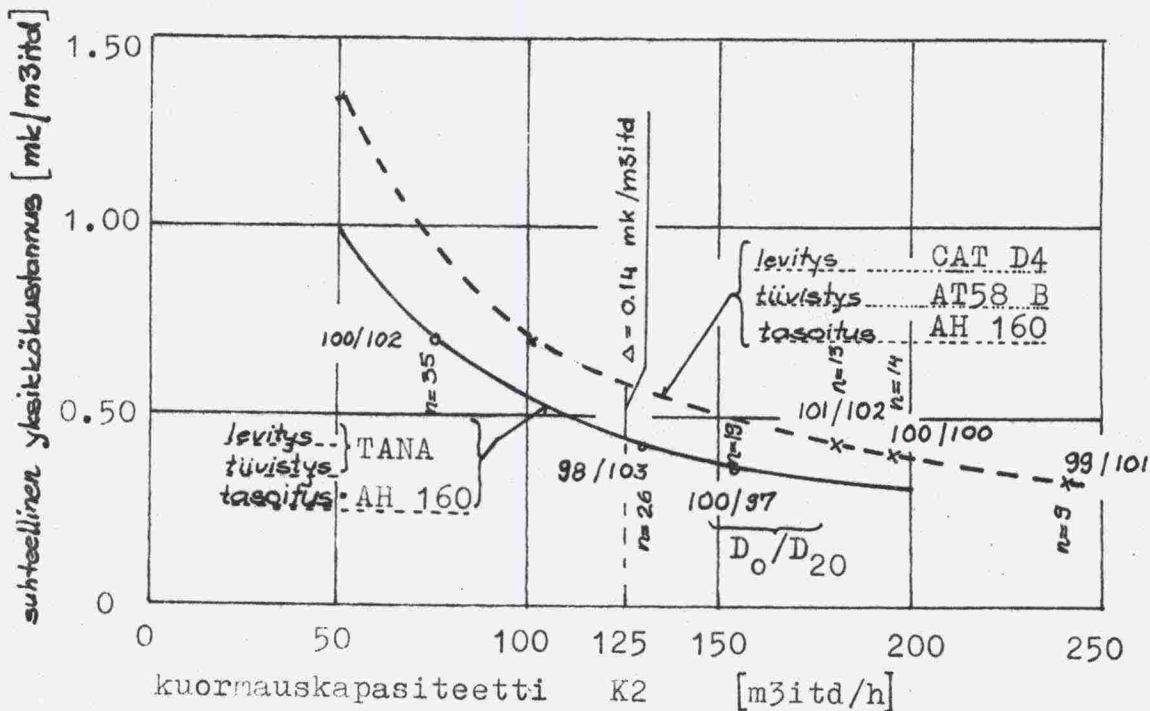
Kuva 59. Eristyskerroksen rakentaminen.

Kuvasta 59 voidaan havaita, että menetelmässä (TANA) pinta-tiiviys oli keskimäärin n. 97 % ja kerroksen alaosan tii-

viys n. 98 % proctos-tiiviydestä (huom. alaosa tiiviimpää). Kokeet suoritettiin täysillä painolasteilla (jyrän kokonaispaino n. 24 tn). Mikäli jyrästä puuttuivat painolasit (jyrän paino tällöin noin 14 tn) olivat tiiviysarvot pinnassa 80 % ja kerroksen alaosassa 85 %. Kun ilman lämpötila laski  $-15...-20^{\circ}\text{C}$  ei tiivistyminen ollut enää riittävää (pinnassa 75 % ja alaosassa 81 %), mikä johtui ilmeisesti siitä, että vesi ( $w = 5.0\%$ ) ehti kuljetuksen aikana kiteytyä rakeiden ympärille.

Tavanomaisella systeemillä, missä CAT D4 suoritti levityksen ja kumipyöräjyvä JK 20 tiivisti jäivät tiiviysarvot huomattavasti alle edellisten (n. 5 %-yksikköä).

Menetelmien välinen kustannusero oli keskimäärin n. 0.58 mk/m<sup>3</sup>itd TANA-menetelmän hyväksi.



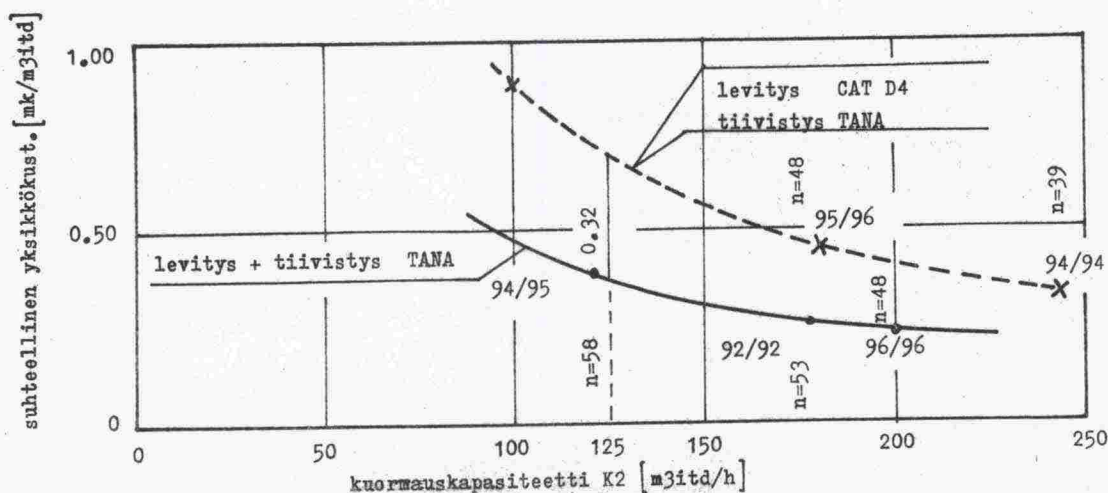
Kuva 60. Jakavan kerroksen rakentaminen.

Jakavan kerroksen teossa olivat keskimääräiset tiiviysarvot  $D_0 = 100\%$  ja  $D_{20} = 101\%$ , kun jyrän paino oli väh. 24 tn

sekä ilman lämpötila alle  $-10^{\circ}\text{C}$ . Painolastien puuttuessa olivat tiiviysarvot  $D_0 = 88 \%$  ja  $D_{20} = 90 \%$ . Materiaalin laadulla tuntui olevan vaikutusta tiivistymiseen: runsaasti n. 15...20 cm kokoisia kiviä sisältäneet materiaalit tiivistyivät n. 5...6 %-yksikköä heikommin. Mikäli ilman lämpötila oli  $-15...-20^{\circ}\text{C}$  ei riittävää tiivistymistä saatu aikaan, mikä johtui materiaalin ilmeisestä jäätymisestä kuljetusvaiheessa ( $D_0 = 85 \%$ ,  $D_{20} = 85 \%$  ja  $W = 4.7 \%$ ). Lisäksi koneen paino tässä pakkaskokeessa oli vain 16.6 tn. Keskimääräinen kustannussäästö oli n. 0.48 mk/m<sup>3</sup>itd, mikäli vertailtavan systeemin tiivistyskoneena käytettiin kumipyöräjyrää JK 20. Jos tiivistyskoneena käytettiin täryjyrää JT 05 oli kustannusero n. 0.14 mk/m<sup>3</sup>itd.

Penger materiaalin tiivistysarvot riippuivat erityisesti ilman lämpötilasta, materiaalin rakeisuudesta, materiaalin kosteudesta, koneen painosta ja rengaspaineesta. Kun ilman lämpötila oli noin  $0...5^{\circ}\text{C}$ , materiaali optimikostea, jyrän paino n. 22 tn ja rengaspaine n. 5 aty, saavutettiin vaadittavat ( $\geq 95 \%$ ) tiiviystulokset kuormauskapasiteetin suuruudesta riippumatta. Kun ilman lämpötila oli n.  $-5...-16^{\circ}\text{C}$  ja materiaalin kosteuspitoisuus noin puolet optimimäärästä sekä rengaspaine n. 3.5 aty, jäivät tiiviysarvot n. 88...95 %-yksikköön.

Keskimääräinen kustannussäästö oli n. 0.51 mk/m<sup>3</sup>itd 35...40 cm paksun kerroksen teossa.



Kuva 31. Penkerään rakentaminen.



## 7. TIIIVISTYSKAPASITEETIT JA -KUSTANNUKSET

### 7.1 Kapasiteettien laadinta perusteista

Kapasiteetilla ymmärretään suoritemäärää aikayksikköä kohti. Kapasiteettiin vaikuttavan ajan mukaan puhutaan erilaisista kapasiteeteista:

K1-kapasiteetti	eli peruskapasiteetti;	sisältää	T1-ajan
K2-	"	eli menetelmäkapasiteetti;	sisältää T2- "
K3-	"	eli käyttö-	" ; " T3- "
K4-	"	eli työvaihe-	" ; " T4- "

T1-aika (perusaika) sisältää suoran tien-, liittymien-, linja- autopysäkkien-, erikoiskohteiden (esim. pysäköinti-alueiden) jyräyksen.

TL1-aika (menetelmän lisäaika) käsittää kääntymiset ja suunnanmuutokset.

T2-aika (menetelmäaika) =  $T1 + TL1$

TL2-aika (käytön lisäaika) sisältää kahvitauot, ruokataukojen ylitykset, myöhäiset aloitukset, aikaiset lopetukset, koneen huollot, työnjohdon ohjeiden antoja yms.

T3-aika (työmaa-aika) =  $T2 + TL2 = T1 + TL1 + TL2$

TL3-aika (työvaiheen lisäaika) käsittää ruokatunnit ja yli 1 tunnin pituiset tauot

T4-aika (työvaiheaika) =  $T3 + TL3 = T1 + TL1 + TL2 + TL3$

Perusaika ( $T1$ ) voidaan laskea teoreettisesti:  $T1 = L/v$ , missä  $L$  = jyrättävän alueen pituus [m] ja  $v$  = jyrän nopeus [m/h].

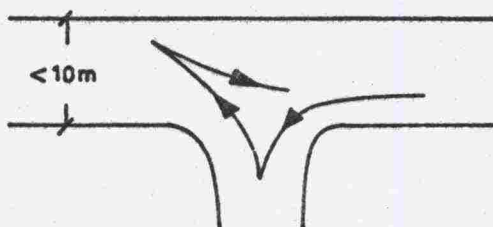
Menetelmän lisäaika ( $TL1$ ) riippuu jyrätyypistä ja käännöstavasta seuraavasti:

- keskiraskaalla täryjyrällä (JT 05), jota yleensä vetää nelivetoinen kumipyörätraktori, voidaan yli 10 m leveis-



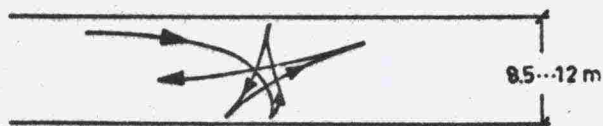
sä teissä tai sitä kapeimmissa teissä liittymien kohdalla suorittaa U-käännöksenä, mihin kuuluu keskimäärin aikaa noin 57 cmin;

- jos käännös suoritetaan 3-vaiheisena kuvan 62 mukaisesti, kuuluu tällaiseen käännökseen aikaa noin 107 cmin;



Kuva 62. 3-vaiheinen käännös.

- mikäli käännös suoritetaan 5-vaiheisena (kuva 63) kuuluu tällaiseen käännökseen aikaa noin 220. Tämä käännöstapa vaikuttaa varsin yleiseltä kääntymistavasta, joten myöhemmin esille tulevilla kapasiteeteilla on käytetty TL2-aikaa 220 cmin.



Kuva 63. 5-vaiheinen käännös.

- kun tiivistys suoritetaan raskaalla täryjyrällä (JT 07), jota yleensä vetää telaketjutraktori, voidaan käännös suorittaa ns. U-käännöksenä (vaatii n. 7 m leveän alueen). Aikaa tällaiseen käännökseen kuluu noin 87 cmin.
- kumipyöräjyrällä (JK 20) korvataan käännös suunnan muutoksella. Aikaa siihen kuluu noin 10 cmin.

T3- ja T4-aikoihin sen tarkemmin tässä yhteydessä puuttumatta, todettakoon, että tutkimusten mukaan saatiin lisäaikakertoimiksi keskimäärin täryjyrien osalta

$$C2 = \frac{TL2}{T3} = 0.08$$

$$C3 = \frac{TL3}{T4} = 0.68$$

ja kumipyöräjyrien osalta keskimäärin

$$C2 = \frac{TL2}{T3} = 0.07$$

$$C3 = \frac{TL3}{T4} = 0.67$$

Sen mukaan, tarkoitetaanko suoritemäärällä pinta- vai tilavuusyksikköjä, on olemassa pinta- ja massakapasiteetteja.

P i n t a k a p a s i t e e t i l l a tarkoitetaan tässä sitä pintayksikkömäärää, jonka joku tiivistyskone kykenee yhdessä tunnissa tiivistämään ennalta määrättyyn tiiviyyteen (kantavuuteen). Pintakapasiteetti voidaan laskea kaavasta

$$Y = \frac{1}{n} \times \frac{L \times (B - P)}{T1 + \sum_i TLi} \quad (6)$$

missä Y = pintakapasiteetti	m <sup>2</sup> /h
L = jyrättävän alueen pituus	m
B = jyrän valssin leveys	m
n = jyräyskertamäärä	kpl
T1 = perusaika	h
$\sum_i TLi$ = lisäaikojen summa	h

M a s s a k a p a s i t e e t i l l a tarkoitetaan tässä sitä tilavuusyksikkömäärää, jonka jyrä kykenee tiivistämään riittävän tiiviiksi yhdessä tunnissa. Se voidaan laskea kaavasta 7

$$Q = \frac{1}{n} \times \frac{L \times (B - P)}{T_1 + \sum_{i=2} T_{Li}} \quad (7)$$

missä  $Q$  = massakapasiteetti  $|m^3rtr/h|$

$H$  = tiivistettävän kerroksen paksuus  $|m|$

Kaavoissa esiintyvistä lisäaikatermistä  $\sum T_{Li}$  riippuu, mikä kapasiteetti ( $K_1$ -,  $K_2$ -,  $K_3$ - vai  $K_4$ -kapasiteetti) kulloinkin on kyseessä. Kun kyseessä on menetelmäkapasiteetti, on aikatermi  $T_1 + \sum_{i=2} T_{Li} = T_1 + TL_1 = L/v + TL_1$ .

Täryjyrällä Lokomo AT 82, missä  $B = 200$  cm ja  $P = 15$  cm sekä  $TL_1 = 87$  cmin, saadaan  $K_2$ -kapasiteetiksi

$$K_2 = \frac{1}{n} \times \frac{L \times 1.86}{\frac{L}{v} + \frac{87}{6000}} \quad (8)$$

Täryjyrällä Lokomo AT 52, missä  $B = 190$  cm ja  $P = 15$  cm sekä  $TL_1 = 220$  cmin, saadaan  $K_2$ -kapasiteetiksi

$$K_2 = \frac{1}{n} \times \frac{L \times 1.75}{\frac{L}{v} + \frac{220}{6000}} \quad (9)$$

Kumipyöräjyrällä Lokomo AP 220 saadaan  $K_2$ -kapasiteetiksi, kun  $B = 216$  cm ja  $P = 20$  cm edellyttämällä, että suunnan muutos kestää 10 cmin

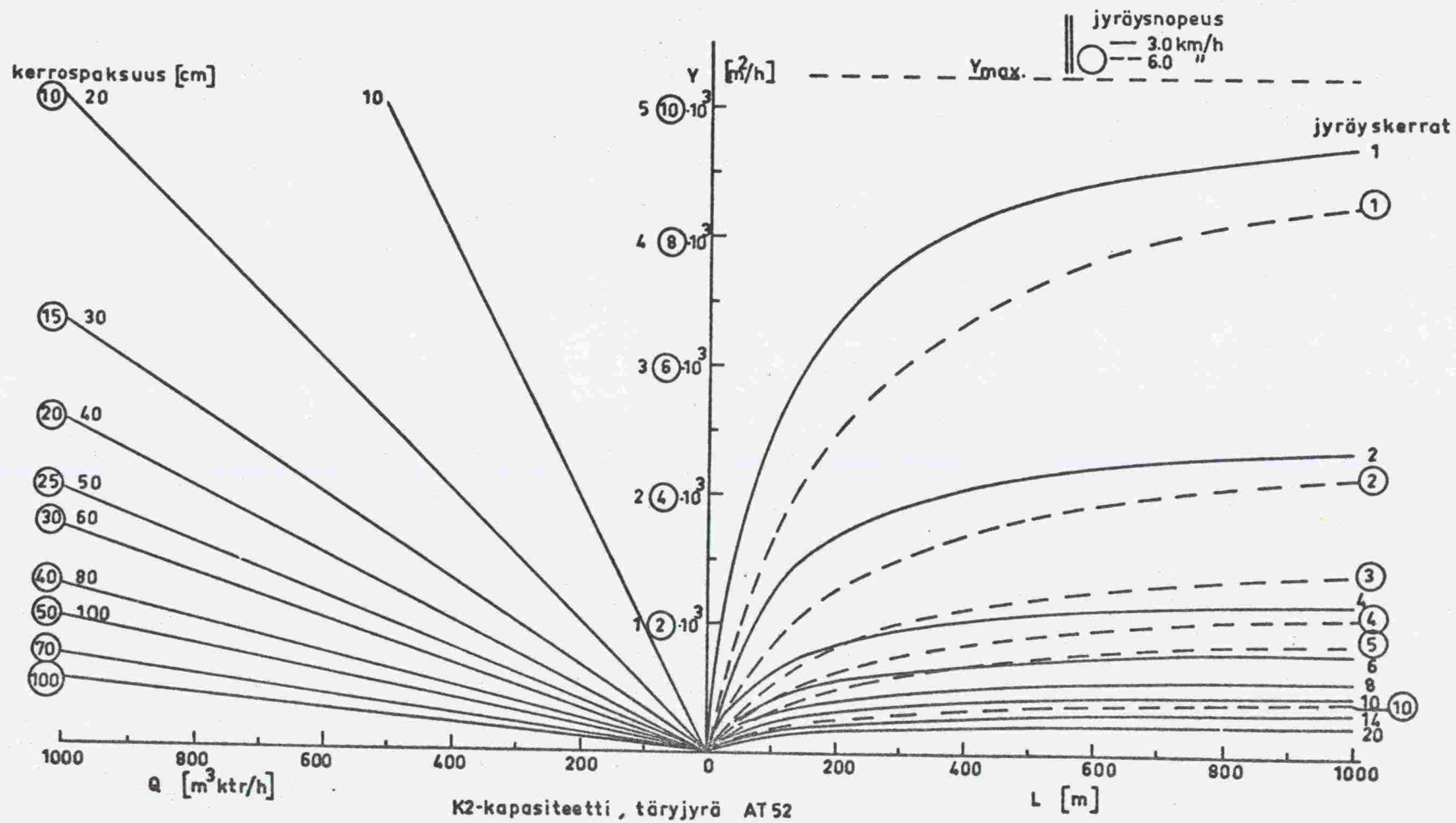
$$K_2 = \frac{1}{n} \times \frac{L \times 1.96}{\frac{L}{v} + \frac{10}{6000}} \quad (10)$$

Kuvissa 64, 65 ja 66 ilmenevät vastaavat arvot graafisesti esitettyinä kahdella eri nopeuden arvolla matkan funktiona.

Määritettäessä  $K_3$ - ja  $K_4$ -kapasiteetteja, voidaan ne laskea  $K_2$ -kapasiteeteista seuraavasti

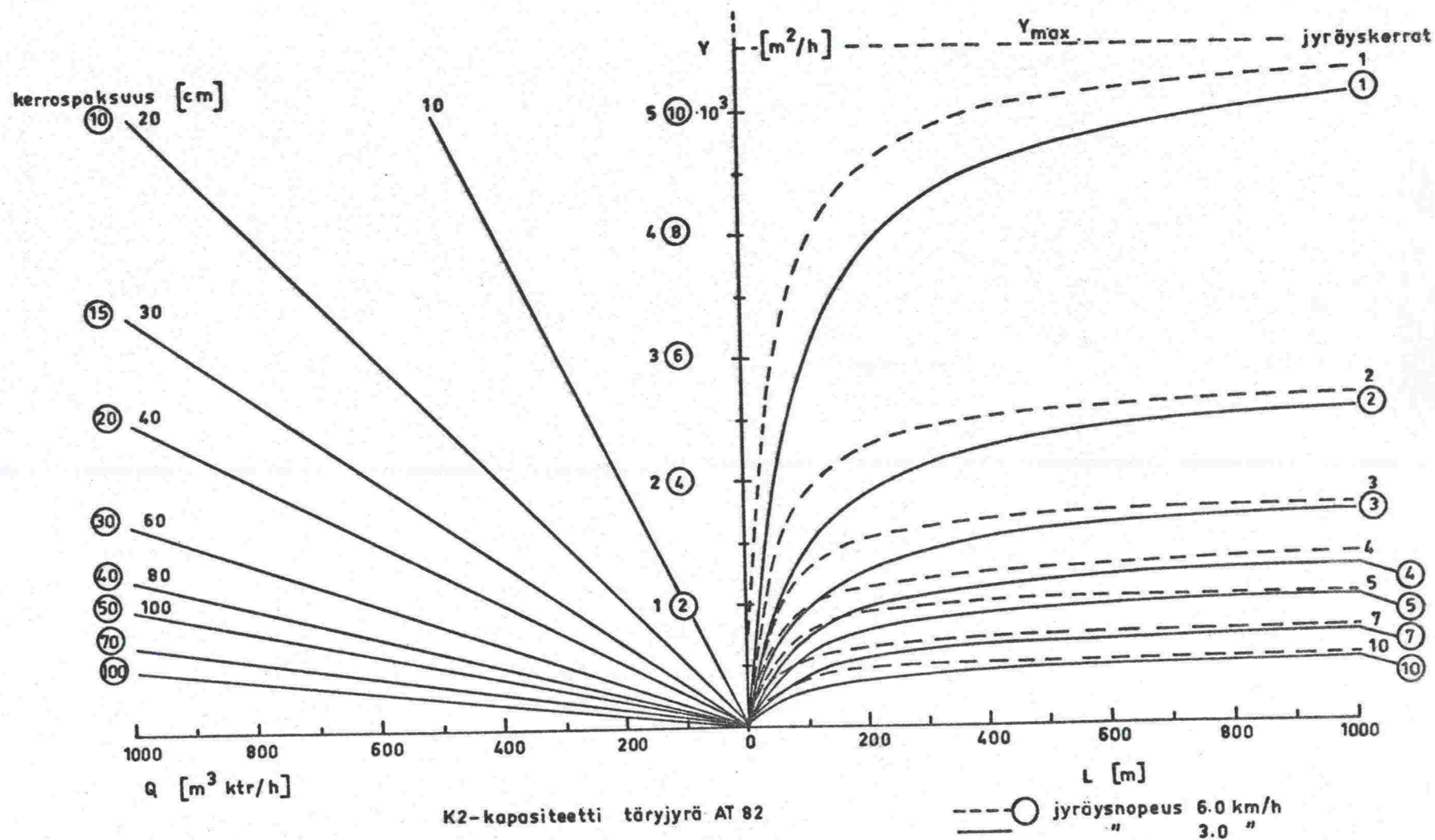
$$K_3 = (1.00 - C_2) \times K_2 = a_2 \times K_2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} K_4 &= (1.00 - C_3) \times K_3 = (1.00 - C_2) \times (1.00 - C_3) \times K_2 \\ &= a_2 \times a_3 \times K_2 \end{aligned} \quad (12)$$

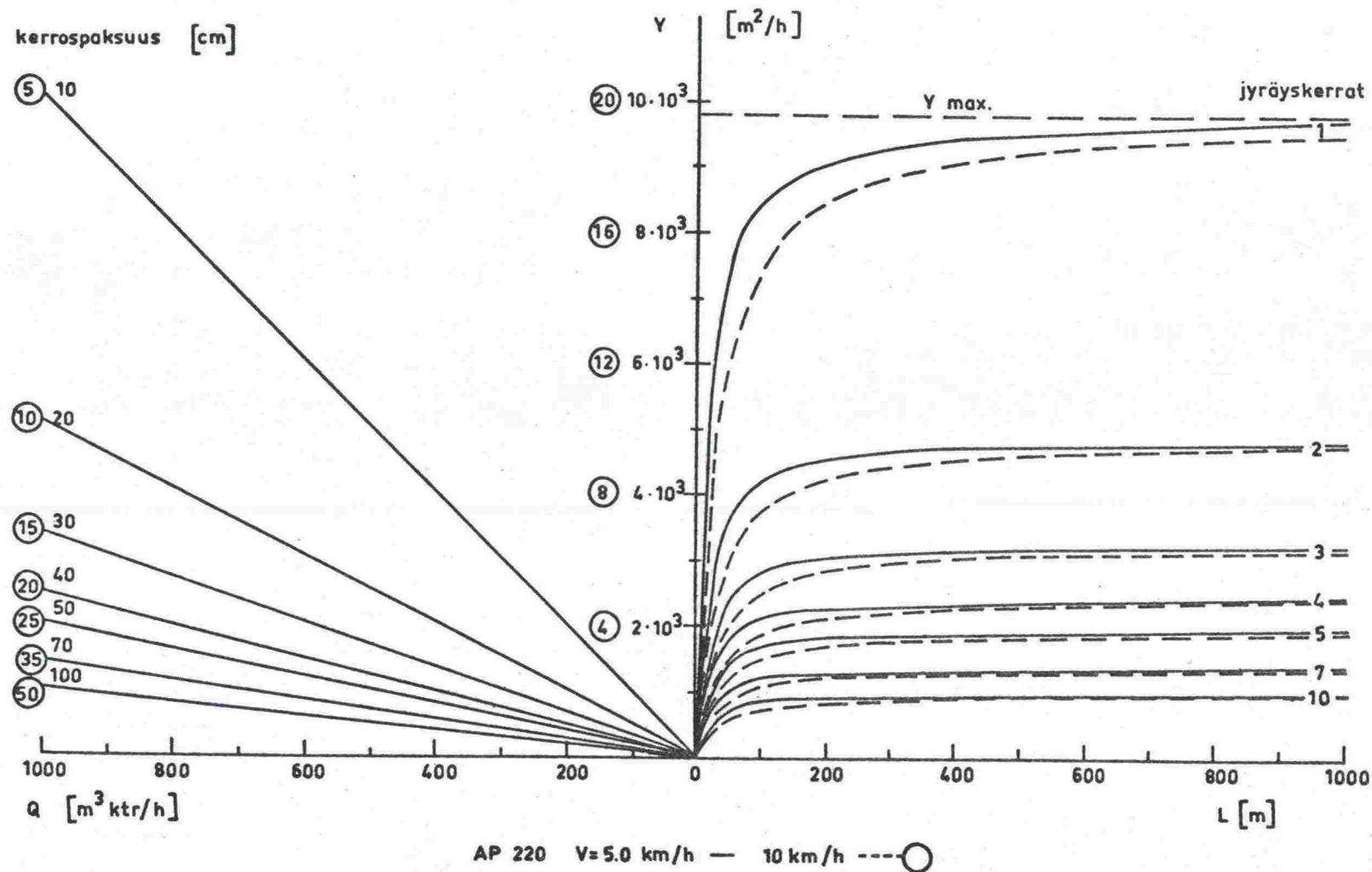


Kuva 64. Täryjyran JT05 menetelmäkapasiteetti.





Kuva 65. Täryjyrän JT07 menetelmäkapasiteetti.



Kuva 66. Kumipyöräjyrän JK20 menetelmäkapasiteetti.

Käyttämällä em. lisäaikakertoimia saadaan täryjyrillä

$$K3 = 0.92 \times K2 \quad (13)$$

$$K4 = 0.32 \times K3 = 0.29 \times K2 \quad (14)$$

ja kumipyöräjyrillä

$$K3 = 0.93 \times K2 \quad (15)$$

$$K4 = 0.33 \times K3 = 0.31 \times K2 \quad (16)$$

Lisäaikoihin sisältyvät myöskin vapaavuorot.

## 7.2 Tiivistyskustannukset

Tiivistyskustannukset sisältävät sekä kastelu- että jyräyskustannukset. Kastelukustannukset riippuvat etäisyydestä vedenottamoon seuraavasti:

kuljetuksen etäisyys km	yksikköhinta mk/m <sup>3</sup>
0 - 2	1.24
2 - 3	1.48
3 - 4	1.70
4 - 5	1.93
5 - 6	2.16

Taulukko 6. Yksikköhinnan riippuvuus etäisyydestä vedenottamoon.

Vedenjakokustannukset ovat tällöin taulukon 7 mukaiset:

lisättävä vesimäärä $l/m^2$ ( $l/m^3rtr$ )	kastelukust. $ mk/m^2 $ ajomatkan ollessa $ km $				
	0 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6
40	0.050	0.059	0.068	0.077	0.086
60	0.074	0.089	0.102	0.166	0.130
80	0.099	0.118	0.136	0.154	0.173
100	0.124	0.148	0.170	0.193	0.216
120	0.149	0.178	0.202	0.231	0.259
140	0.173	0.207	0.238	0.270	0.320
.	-	-	-	-	-
400	0.496	0.592	0.680	0.772	0.865

Taulukko 7. Kastelukustannukset  $|mk/m^2|$ ,  $|mk/m^3rtr|$

Esimerkki:

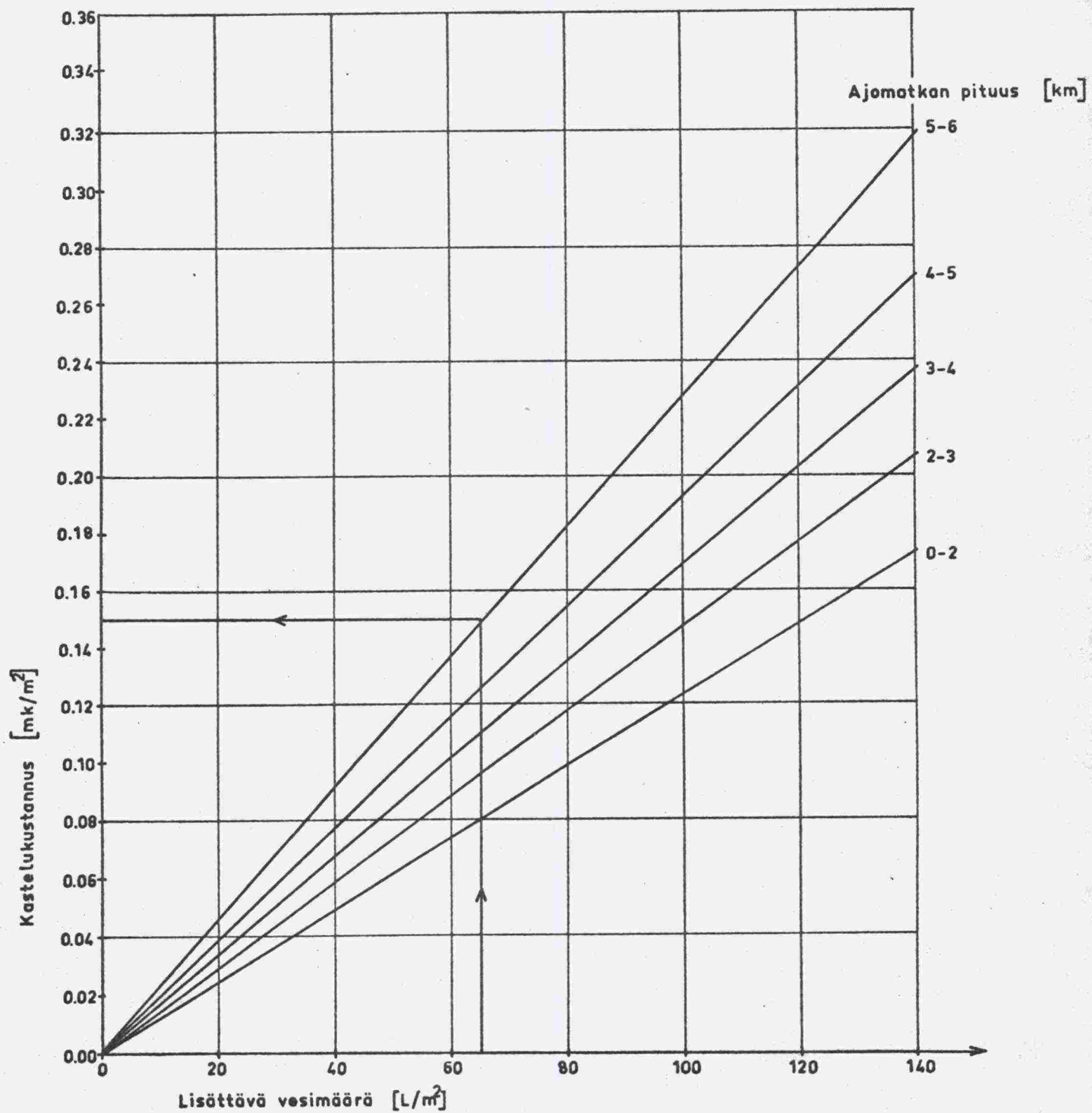
Suoritetaan jakavan kerroksen kastelu. Jakavasta kerroksesta tiedetään seuraavaa:  $H = 35$  cm,  $\gamma_k = 2.04$  kg/dm<sup>3</sup>,  $w_{ky} = 11.2$  %,  $w_{kl} = 2.1$  %,  $w_{opt} = 6.3$  % sekä ajomatka on 5 - 6 km

Lisättävä vesimäärä:  $Q = 10 \times (11.2 - 2.1) \times 2.04 \times 0.35 = 65$  l/m<sup>2</sup> (= 185.5 l/m<sup>3</sup>rtr)

Kastelukustannukset ovat tällöin noin 0.15 mk/m<sup>2</sup> (= 0.41 mk/m<sup>3</sup>rtr).

Kun tarkastellaan K2-kapasiteettiarvoja (kuvat 64, 65 ja 66) niin voitaneen olettaa, ettei kapasiteetti kasva merkitsevästi kumipyöräjyrällä 200 m:n ja täryjyrillä 400 m:n jyräysmatkan jälkeen. Tällä olettamuksella saadaan kuvissa 68, 69 ja 70 olevien nomogrammien yläosat. Koska K2-kapasiteetit ilmaistaan joko  $|m^2/h|$  tai  $|m^3rtr/h|$  voidaan ne muuttaa suoraan joko  $|mk/m^2|$  tai  $|mk/m^3rtr|$  ottamalla huomioon jyrien tuntitaksat.





Kuva 67. Kastelukustannukset.

Kuvissa 68, 69 ja 70 olevien nomogrammien neljännessä neljänneksessä ovat kastelukustannukset  $|\text{mk}/\text{m}^3\text{rtr}|$ . Kun jyräyskustannuksiin lisätään kastelun aiheuttamat kustannukset saadaan tiivistyskustannuksiksi ko. nomogrammien kolmannessa neljänneksessä olevat arvot (graafisesti esitettyinä).

Edellä on tarkasteltu tiivistyskustannuksia tilavuusyksikköä kohti. Koska usein ilmaistaan tiivistyskustannukset myös pintayksikköä kohti voidaan ne tässä yhteydessä laskea kaavasta

$$K' = k/Y + v \quad (17)$$

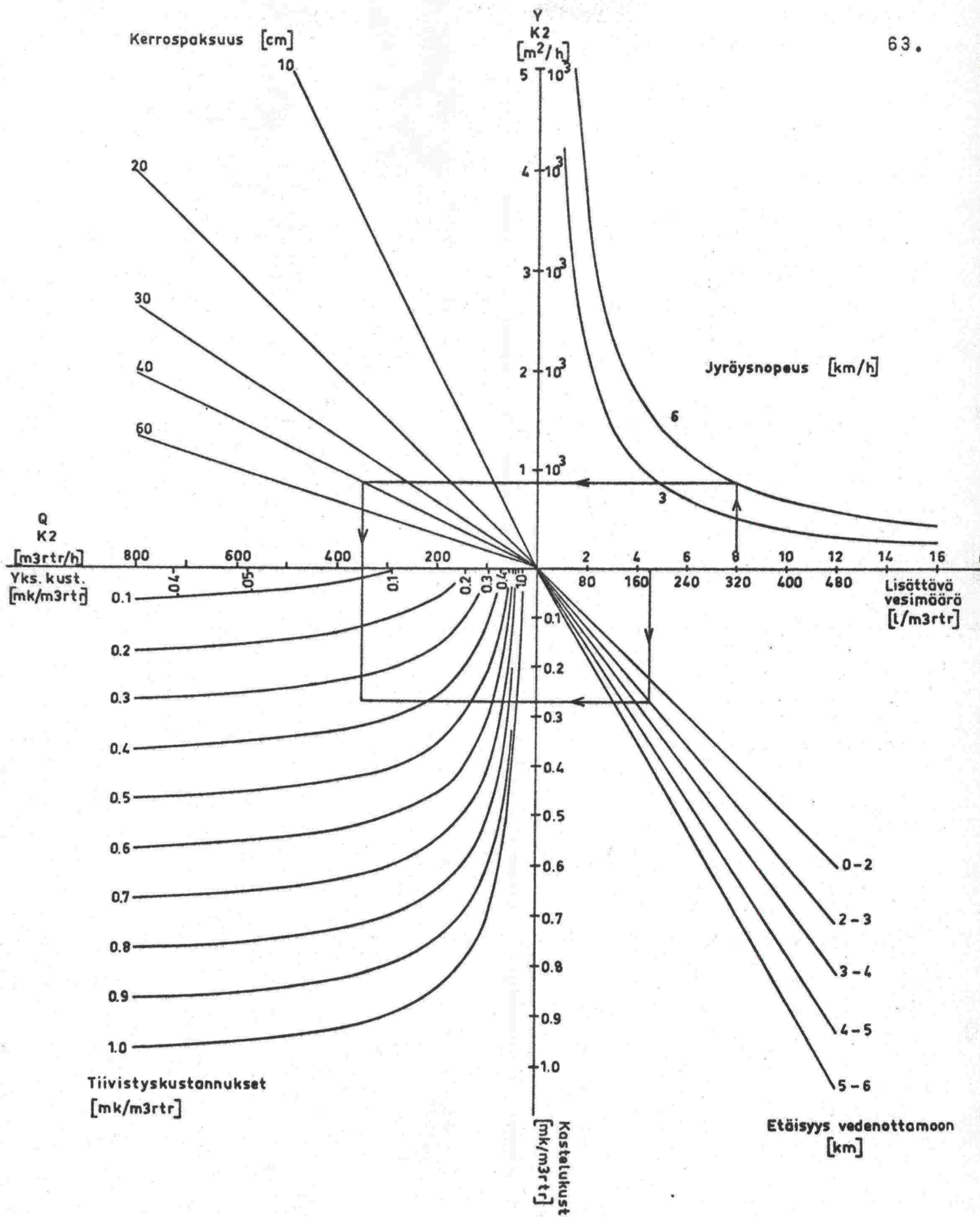
missä  $K'$  = tiivistyskustannukset  $|\text{mk}/\text{m}^2|$   
 $k$  = koneen tuntihinta  $|\text{mk}/\text{h}|$   
 $Y$  = pintakapasiteetti  $|\text{m}^2/\text{h}|$   
 $v$  = kastelukustannukset  $|\text{mk}/\text{m}^2|$

Pintakapasiteetti  $Y$  voidaan määrittää likimäärin olettamalla, että jyräysmatkat kumipyöräjyrillä on yli 200 m ja täryjyrillä yli 400 m taulukon 8 mukaan. Kastelukustannukset  $v$  voidaan määrittää graafisesti kuvasta 67.

jyrä	$Y \text{ m}^2/\text{h}$	nopeus $ \text{km}/\text{h} $
AP 220	18800/n	10
"	9600/n	5
AT 82	9400/n	6
"	5100/n	3
AT 52	7000/n	6
"	4200/n	3

Taulukko 8. Pintakapasiteetin määrittäminen.

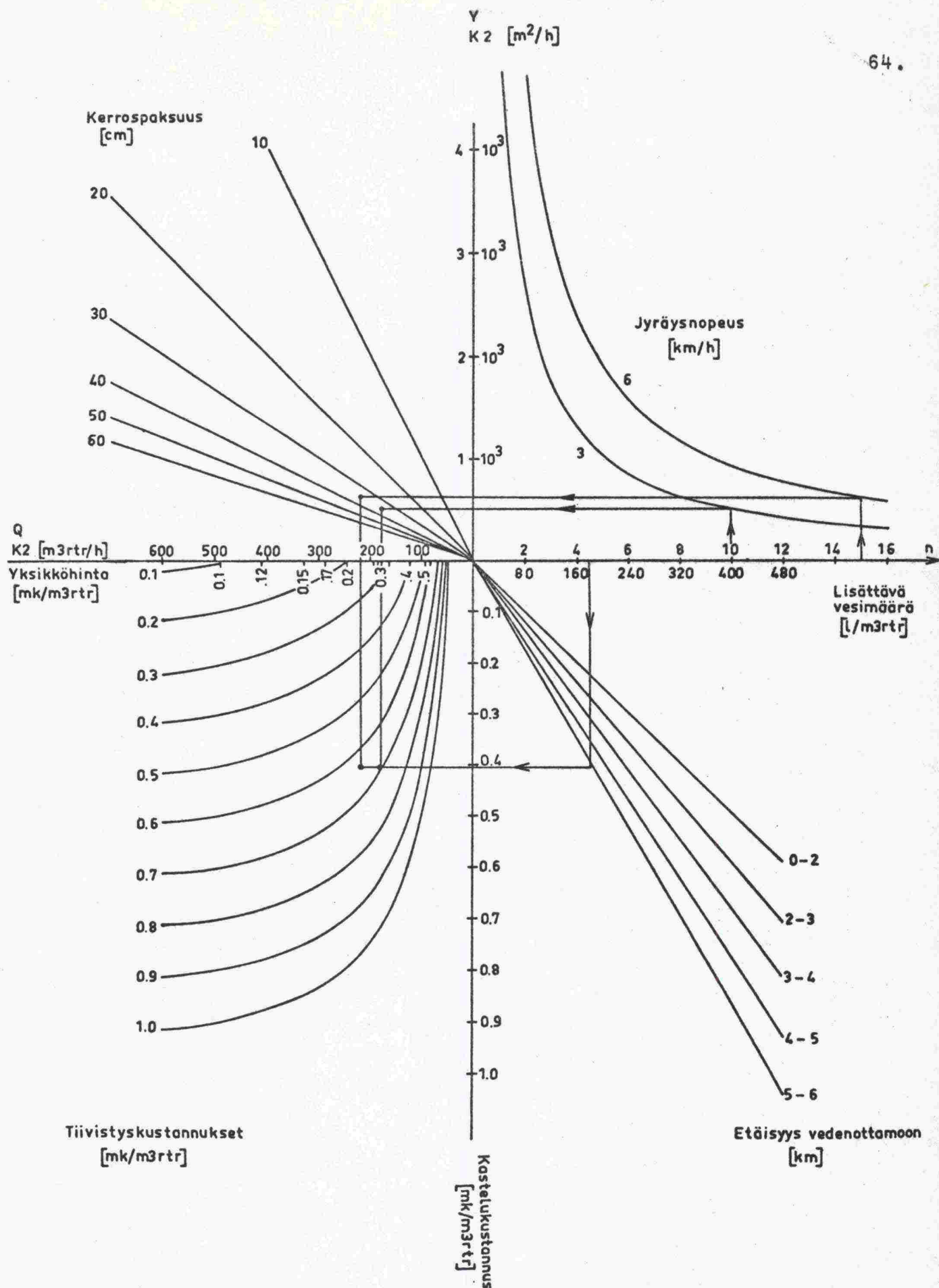
Taulukossa esiintyvä suure  $n$  tarkoittaa jyräyskertamäärää  $|\text{kpl}|$ .



Kuva 68. Täryjyrä LOKOMO AT 52.

K2-kapasiteetit

Kastelu-, jyräys- ja tiivistyskustannukset

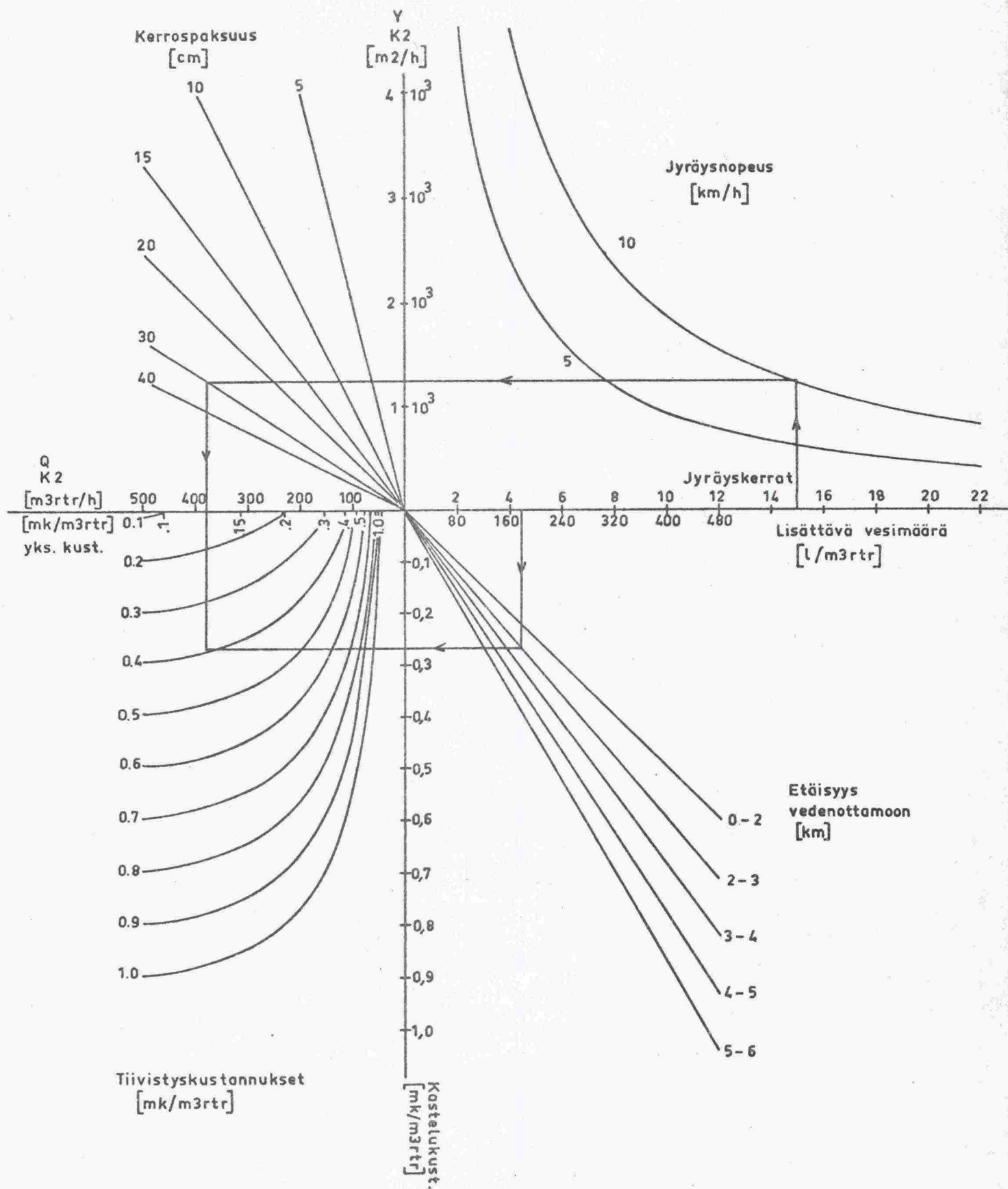


Kuva 69. Tärtyjyrä LOKOMO AT 82

K2-kapasiteetit

Kastelu-, jyräys- ja tiivistyskustannukset





Kuva 70. Kumipyöräjyvä LOKOMO AP 220

K2-kapasiteetit

Kastelu-, jyräys- ja tiivistyskustannukset

Esimerkki:

Tiivistetään jakava kerros, josta tiedetään seuraavaa:

$H = 35 \text{ cm}$ ,  $L > 400 \text{ m}$ ,  $\gamma_k = 2.04 \text{ kg/dm}^3$ ,  $w_{ky} = 11.2 \%$ ,  
 $w_{opt} = 6.3 \%$ ,  $w_{kl} = 2.1 \%$ , vedenjakomatka 5 - 6 km sekä materiaalin kivisyys n. 30 %.

Käytettävissä on raskas täryjyry JT 07 (49 mk/h).

Jos jyräysnopeutena käytetään 3.0 km/h, tarvitaan tällöin n.  
 $12/2 \times 2 = 12$  jyräyskertaa (kuvista 18a ja 19 ottamalla huomioon, että kuva 19 on keskiarvokuvio).

Tällöin saadaan

- kuva 69 ja taulukko 8:  $Y = 5100/12 = 425 \text{ m}^2/\text{h}$   
 $Q = 149 \text{ m}^3\text{rtr}/\text{h}$
- kuva 67: kastelukustannukset 0.15 mk/m (0.41 mk/m<sup>3</sup>rtr)

Tiivistyskustannukset:

$$K = 0.329 + 0.410 = 0.739 \text{ mk/m}^3\text{rtr}$$

$$K' = 0.115 + 0.150 = 0.265 \text{ mk/m}^2$$

## 8. KAPASITEETTI, JYRÄYSNOPEUS JA JYRÄYSKUSTANNUKSET

Kun tarkastellaan jyrien kapasiteetteja, havaitaan niiden kasvavan nopeuden kasvaessa. Tiivistystyömäärä, joka on kääntäen verrannollinen kapasiteetteihin nähden, pienenee tällöin samoin kuin tiivistyskustannuksetkin. Kuitenkaan tiiviyyden (kantavuuden) kasvu ei aina ole verrannollinen jyräysnopeuteen nähden eikä aina edes riittävää tietyillä jyrillä tiivistettäessä.

Tiivistyskoneella on olemassa tietty optimijyräysnopeus, jolla jyrättäessä tiivistyskustannukset ovat minimissä (tiiviysvaatimukset ovat luonnollisesti täytetyt). Näiden tutkimusten avulla kaikille jyrille niitä ei voitu löytää tutkimustulosten vajaavaisuuksien takia. Seuraavassa tarkastellaan 3 jyrää: JT05, JT07 ja JK20 jyräysnopeuden, -kustannusten sekä pintakapasiteettien valossa.

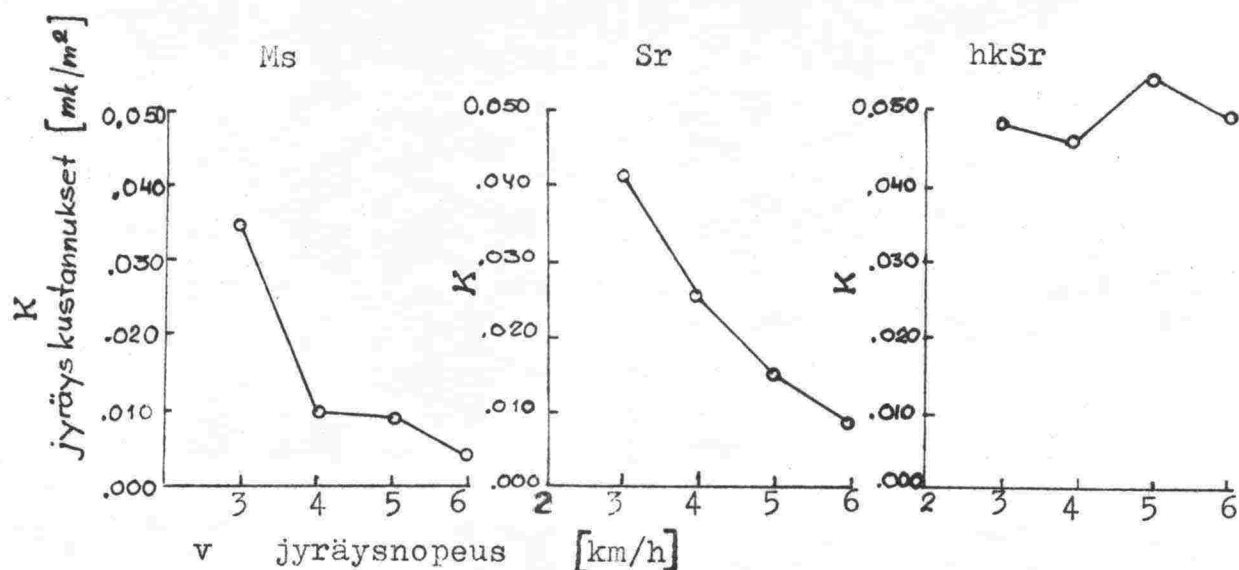
## 8.1 Keskiraskas täryjyrä JT 05

Kantavan kerroksen tiivistys  $v$  [km/h],  $n$  [kpl],  $Y$  [m<sup>2</sup>/h],  
 $K$  [mk/m<sup>2</sup>]

Ms				Sr				hkSr			
$v$	$n$	$Y$	$K$	$v$	$n$	$Y$	$K$	$v$	$n$	$Y$	$K$
3	5	840	0.0345	3	6	700	0.0414	3	7	600	0.0484
4	2	2800	0.0103	4	5	1120	0.0259	4	9	625	0.0464
5	2	2920	0.0099	5	3	1940	0.0150	5	11	530	0.0548
6	1	7000	0.0041	6	2	3500	0.0083	6	12	583	0.0497

Taulukko 9. Kantavan kerroksen tiivistyskapasiteetit ja -kustannukset jyränopeuden funktiona (JT 05).





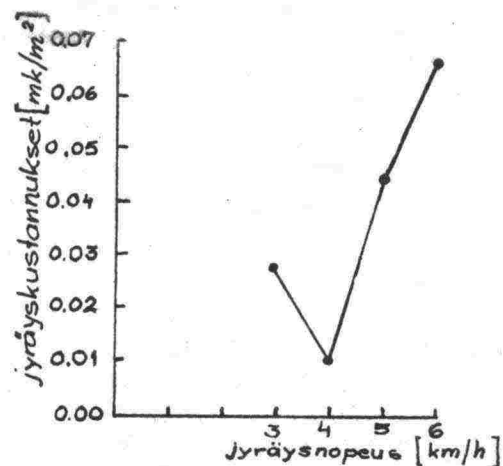
Kuva 71. Kantavan kerroksen tiivistyskapasiteetit ja  
- kustannukset jyräysnopeuden funktiona (JT 05).

Helposti tiivistyvien materiaalien Ms ja Sr tiivistyksessä jyräyskustannukset alenivat nopeuden kasvaessa ( $\geq 6$  km/h). Sen sijaan hkSr:n tiivistyksessä ilmeni minimikohta kustannuskäyrässä, kun jyräysnopeus  $v = 4$  km/h (kuva 71).

#### Jakavan kerroksen tiivistys

v	n	Y	K
3	4	1050	0.0276
4	4	2800	0.0104
5	9	648	0.0447
6	16	437	0.0664

Taulukko 10. Jakavan kerroksen tiivistyskapasiteetit ja  
-kustannukset jyräysnopeuden funktiona (JT 05)



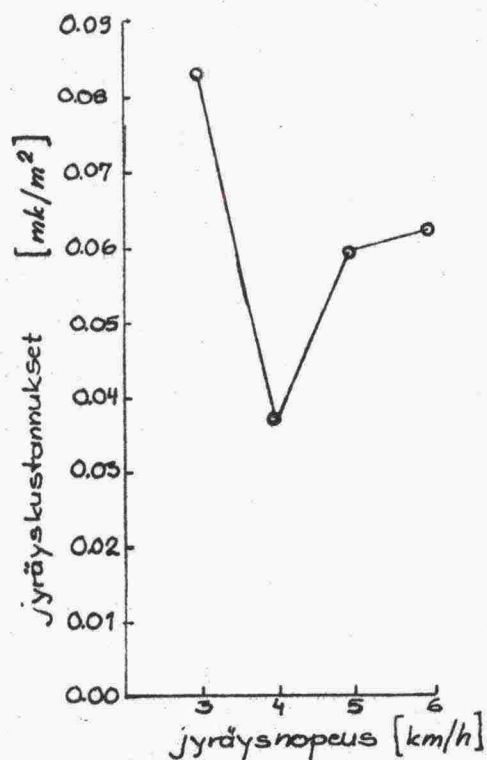
Kuva 72. Taulukon 10 graafinen esitys

Jakavan kerroksen tiivistyksessä osoittautui jyräysnopeuden  $v = 4$  km/h käyttö taloudellisimmaksi (kuva 72).

Eristyskerroksen tiivistys jakavan kerroksen päältä

v	n	Y	K
3	12	350	0.0830
4	7	800	0.0353
5	12	484	0.0596
6	15	467	0.0622

Taulukko 11. Eristyskerroksen tiivistyskapasiteetit ja -kustannukset nopeuden funktiona (JT 05) (tiivistys jakavan kerroksen päältä).



Kuva 73. Taulukon 11 graafinen esitys

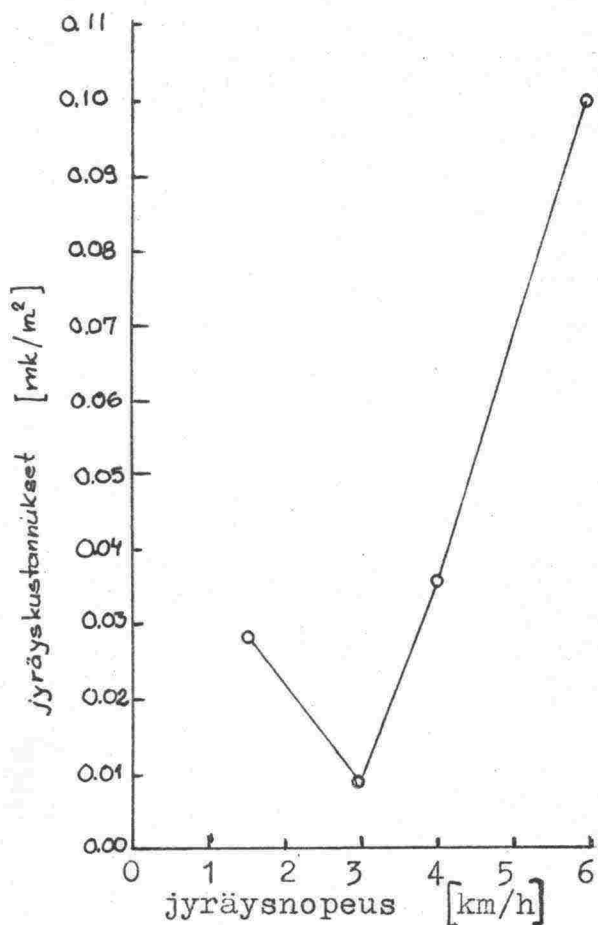
Kun eristyskerrosta tiivistettiin jakavan kerroksen päältä osoittautui eristyskerroksen osalta jyräysnopeus  $v = 4$  km/h myöskin taloudellisimmaksi.

## 8.2 Raskas tärjyry

Jakavan kerroksen tiivistys

v	n	Y	K
1.5	1	1700	0.0288
3	1	5100	0.0096
4	5	1360	0.0360
6	20	470	0.1040

Taulukko 12. Jakavan kerroksen tiivistyskapasiteetit ja -kustannukset nopeuden funktiona (JT 07)



Kuva 74. Taulukon 12 graafinen esitys

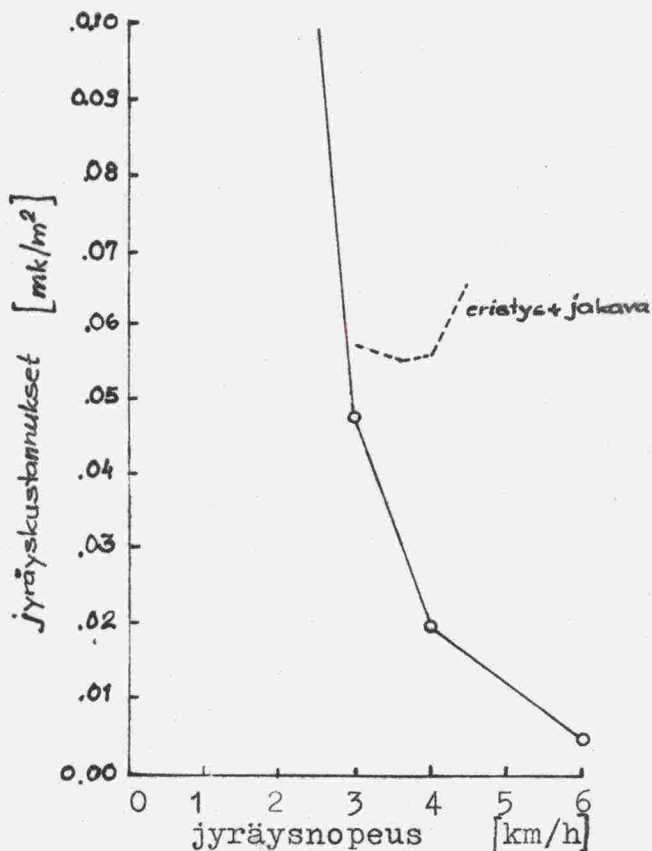
Kuvan 74 mukaan vaikuttaa jyräysnopeus  $v = 3$  km/h taloudellisimmalta jakavan kerroksen tiivistyksessä.



Eristyskerroksen tiivistys jakavan kerroksen päältä

v	n	Y	K
1.5	21	121	0.4050
3	5	1020	0.0481
4	3	2270	0.0206
6	1	9400	0.0052

Taulukko 13. Eristyskerroksen tiivistyskapasiteetit ja -kustannukset nopeuden funktiona (JT 07) (tiivistys jakavan kerroksen päältä).



Kuva 75. Taulukon 13 graafinen esitys sekä eristys- ja jakavan kerroksen jyräyskustannukset.

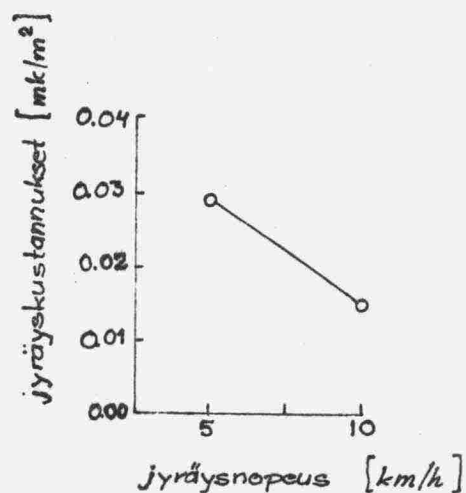
Kun eristyskerrosta tiivistettiin jakavan kerroksen päältä, alenivat jyräyskustannukset nopeuden kasvaessa (kuva 75). Koska saman aikaisesti pyrittiin myös jakavan kerroksen osalta taloudelliseen tiivistykseen, olisi tällöin ollut käytettävä noin 3.5...4.0 km/h jyräysnopeutta (kuva 75), jolloin yhteiskustannukset olivat minimissä.

## 8.2 Kumipyöräjyvä

Kantava kerros

v	n	Y	K
5	6	1600	0.029
10	6	3167	0.015

Taulukko 14. Kantavan kerroksen tiivistyskapasiteetit ja -kustannukset jyräysnopeuden funktiona (JK 20)



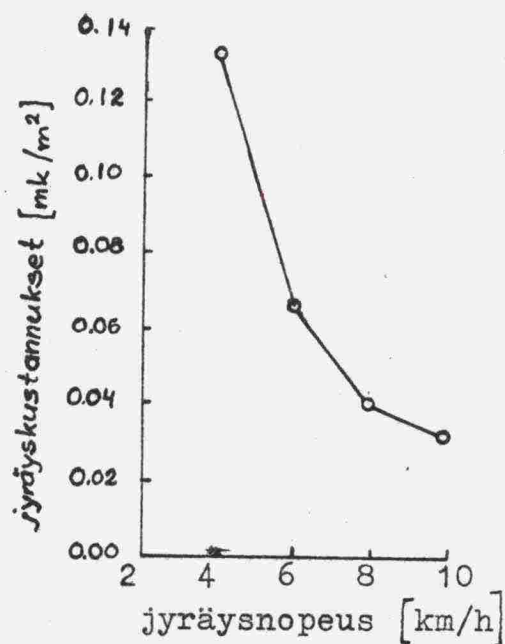
Kuva 76. Taulukon 14 graafinen esitys

Kantavan kerroksen tiivistyksessä (JK 20:11ä) vaikuttaa suuren jyräysnopeuden käyttö taloudelliselta. Nopeuden kaksinkertaistuttua (5.0→10.0 km/h) alenivat jyräyskustannukset lähes puolella (kuva 76).

Jakava kerros

v	n	Y	K
4	22	350	0.1315
6	17	678	0.0678
8	13	1157	0.0400
10	13	1445	0.0320

Taulukko 15. Jakavan kerroksen tiivistyskapasiteetit ja -kustannukset jyräysnopeuden funktiona (JK 20)



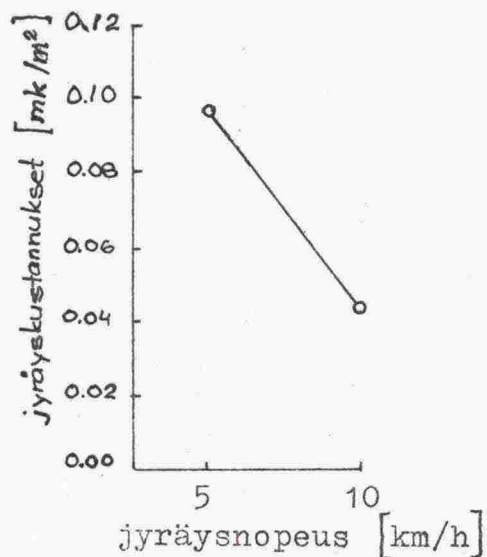
Kuva 77. Taulukon 15 graafinen esitys (JK 20)

Jakavan kerroksen tiivistyksessä lienee taloudellisinta käyttää suurta  $\geq 10$  km/h nopeutta (kuva 77).

Eristyskerroksen tiivistys jakavan kerroksen päältä

v	n	Y	K
5	20	480	0.096
10	18	1042	0.044

Taulukko 16. Eristyskerroksen tiivistyskapasiteetit ja -kustannukset jyräysnopeuden funktiona jakavan kerroksen päältä jyrättynä (JK 20).



Kuva 78. Taulukon 16 graafinen esitys.

Eristyskerroksen tiivistyksessä jakavan kerroksen päältä jyräyskustannukset alenivat voimakkaasti nopeuden kasvaessa (kuva 78).

#### 8.4 Y h t e e n v e t o

Kumipyöräjyrätiivistyksessä vaikutti eri kerrosten tiivistyksessä jyräysnopeuden  $\geq 10$  km/h käyttö taloudellisimmalta. Keskiraskaalla täryjyrällä JT 05 jyrättäessä kantavaa kerrosta (Ms, Sr) alenivat jyräyskustannukset myöskin nopeuden kasvaessa ( $\rightarrow 6$  km/h). Jakavan kerroksen tiivistyksessä sen sijaan ilmeni minimikohta jyräyskustannuksissa nopeuden oltua 4 km/h. Saman aikaisesti tiivistettäessä eristyskerrosta ilmeni jyräyskustannuksissa minimi, kun nopeutta 4 km/h käytet-



tiin. Raskasta täryjyrää JT 07 käytettäessä oli jakavan kerroksen jyräyksessä nopeuden 3 km/h käyttö taloudellisinta. Kun saman aikaisesti tiivistettiin myös eristyskerrosta oli nopeus 3.5...4.0 km/h edullisin. Pelkästään eristyskerroksen tiiviyyttä tarkasteltaessa alenivat jyräyskustannukset nopeuden kasvaessa.

Jyrä	Jyräyskustannukset K  mk/m <sup>2</sup>			
	kantava	jakava	eristys <sup>x)</sup>	eristys + jakava
JT 05	0.050 0.008 Sr 0.004 Ms	0.010	0.036	0.036
JT 07	-	0.010	0.005	0.034 (0.015)
JK 20	0.015	0.003	0.044	0.044

Taulukko 17. Jyrien vertailu jyräyskustannusten perusteella.

x) Jyräys jakavan kerroksen päältä

Taulukon 17 mukaan osoittautui kantavan kerroksen tiivistyksessä JT 05 taloudellisimmaksi eräiden materiaalien osalta (MSr, Sr). Muutkin kantavan kerroksen materiaalit huomioon ottaen oli JK 20 halvin jyrä kantavan kerroksen tiivistyksessä.

Jakavan kerroksen osalta oli JK 20 noin 2/3 täryjyrien kustannuksia halvempi.

Tiivistettäessä jakavaa ja eristyskerrosta yhtä aikaa osoittautui JT 07 edullisimmaksi tosin ei ratkaisevasti. Jos kuitenkin JT 07 käytettäisiin kahdella eri nopeudella: eristys + jakava kerros = 3.5...4.0 km/h ja jakava kerros  $v = 3$  km/h, alenisivat jyräyskustannukset teoriassa  $0.034 \rightarrow 0.015$  mk/m<sup>2</sup>. Tällöin ero muihin jyriin olisi merkittävämpi.

# KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Ahlfors, B.: Täryjyrien perusteknologia. Maarakennus ja kuljetus, 5 (1967) 5 ja 6.
2. Annila, M.: Tutkimuksia tienkerrosten tiivistämisestä. Maarakennus ja kuljetus 6 (1968) 3.
3. Anttila, J.: Tierakenteiden talvitiivistämisestä Diplomityö 1969, Oulu
4. Banaschek, K.: Kumipyöräjyrien käyttö maanrakennus- ja päällystystöissä. Tielehti 35 (1965) 8.
5. Bruzelius, N.: Om komprimering av jord. Statens Väg-institut: Meddelande 87, Stockholm 1954.
6. Forssblad, L.: Jordvibrerings undersökningar. Stockholm 1963.
7.        "-        : Maantärytys. Oy E. Sarlin Ab:n teknil-listen tiedotusten julkaisusarja n:o 7, Helsinki 1962.
8.        "-        : Packning av jord- och stenfyllningar. Sundbyberg 1967.
9. Hartikainen, O-P  
    & Orama, R.: Tiivistäminen ja sen tarkkailu. Tie-lehti 31 (1961) 2 ja 3.
10. Härkönen, P.K.: Maantiivistyksen tärykoneista ja niiden valinnasta. Maarakennus ja kuljetus 1 (1963) 6.
11. Helenelund, K.V.: Pohjarakennus- ja maarakennusmekaniikka I ja II, Otaniemi 1967.
12. Jutila, R.: Tärytiivistyksen soveltuvuus patotöihin. Diplomityö, Oulu 1967.

13. Kankainen, J.: Taloudellisuusstandardien aikaansaamiseen tähtäävät tutkimukset maarakennustöissä. R-muistio (1970).
14. Laadunvalvontaohjeet. Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomattomat kerrokset. Tvh. Helsinki 1971.
15. Lahtinen, L.: Tiivistyskoneet ja niiden käytön tekniikka tänään. Maarakennus ja kuljetus 8 (1970) 1.
16. Lehtinen, E.: Levykuormituskoe tienrakennuksessa. Maarakennus ja kuljetus 4 (1966) 11.
17. Maa- ja vesirakennus. RIL. Vammala 1968.
18. Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, osa I ja V. Tvh. Helsinki 1970.
19. Neumann, E.: Neuzeitlicher Strassenbau. Berlin 1959.
20. Orama, R.: Tiivistämisestä ja sen tarkkailusta maarakennustöissä. Rakennusinsinööri (1963) 4.
21. Saarela, A.: Sitomattomien kerrosmateriaalien tiivistämisestä I, II ja III. Tiemies (1970) 5-6, (1971) 1 ja 2.
22. -" : Tien päällysrakenteen sitomattomien kerrosten tiivistäminen. Tvh-J-tsto. Helsinki 1970.
23. -" : Tutkimuksia TANAn soveltuvuudesta penkeen ja kerrosten rakentamiseen. Tvh-J-tsto. Helsinki 1971.
24. Saarenketo, M.: Tutkimus Lokomo AP220 kumipyöräjäyrän ja Lokomo AT58 täryjäyrän käytöstä kerrosmateriaalin tiivistyksessä. Tvl Keski-Suomen piiri. Jyväskylä 1967.



25. Snellman, I.: Vertaileva tiivistämistutkimus itsekulkevasta valssijyrästä Bomag BW200C sekä kumipyöräjyrästä Lokomo AP220 tienkerrosten tiivistämisessä. Tvl Vaasan piiri, Vaasa 1968.
26. Terzaghi, K.,  
Peck, R.: Soil mechanics in Engineering practice. New York 1948.
27. Tienrakennustöiden yleinen työselitys. Tvh. Helsinki 1969.
28. Tuokkola, T.: Näkökohtia maan tiivistämisestä kylmänä vuodenaikana. Maarakennus ja kuljetus 1966:10
29. -"- Tienrakentamisen vaikeuksia talviolosuhteissa. Tielehti 1969:9
30. -"- Maarakentamisesta talvikautena. Rakennustaito 1970:18
31. Tutkimuksia jakavan kerroksen ja louhospenkereen tiivistämisestä Pori-Tampere valtatie rakennustyömaalla ja eristys- ja jakavan kerroksen tiivistämisestä Nokia-Tampere moottoritietömaalla. Tvl Hämeen piiri, Tampere 1966.
32. Vuokrattujen työkoneiden enimmäisohjevuokrat 1.9.1970 lukien, Tvh, Helsinki 1970.



